

(12)特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有權機關  
國際事務局



(43) 國際公開日  
2004 年 5 月 13 日 (13.05.2004)

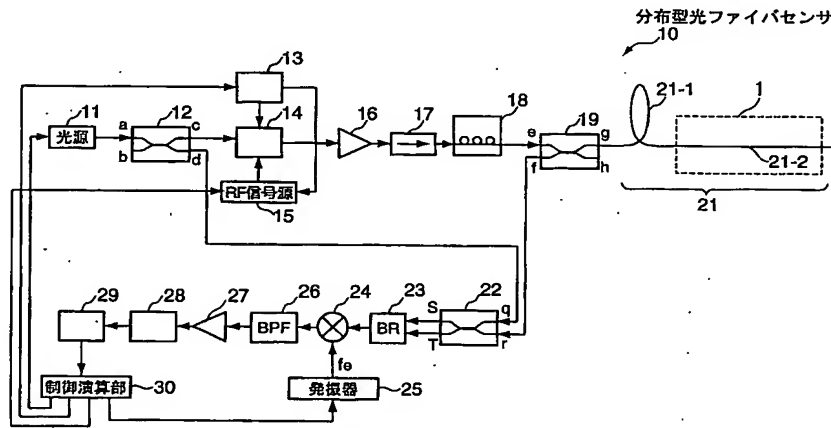
**PCT**

(10) 国際公開番号  
**WO 2004/040241 A1**

- |   |                                   |  |
|---|-----------------------------------|--|
| <p>(51) 国際特許分類<sup>7</sup>:<br/>G01B 11/16, G01K 11/12, G01D 21/00</p>  | <p>G01D 5/26,</p>                 | <p>DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NO, NZ, OM, PH, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.</p>                             |
| <p>(21) 国際出願番号:</p>   | <p>PCT/JP2002/011413</p>          |  |
| <p>(22) 国際出願日:</p>  | <p>2002 年11 月1 日 (01.11.2002)</p> |  |
| <p>(25) 国際出願の言語:</p>  | <p>日本語</p>                        |  |
| <p>(26) 国際公開の言語:</p>  | <p>日本語</p>                        | <p>(84) 指定国 (広域): ARIPO 特許 (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア特許 (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ユーロッパ特許 (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, SK, TR), OAPI 特許 (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).</p> |
| <p>(71) 出願人 および</p>   |                                   |  |
| <p>(72) 発明者: 岸田 欣増 (KISHIDA, Kinzo) [JP/JP]; 〒661-0002 兵庫県 尼崎市 塚口町6-3-7-103 Hyogo (JP).</p>                   |                                   |  |
| <p>(74) 代理人: 小谷 悦司, 外(KOTANI, Etsuji et al.); 〒530-0005 大阪府 大阪市 北区中之島2丁目2番2号ニチメンビル2階 Osaka (JP).</p>          |                                   | <p>添付公開書類:<br/>— 国際調査報告書</p>   |
| <p>(81) 指定国 (国内): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK,</p> |                                   | <p>2 文字コード及び他の略語については、定期発行される各PCTガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語のガイダンスノート」を参照。</p>  |

**(54) Title: DISTRIBUTED OPTICAL FIBER SENSOR SYSTEM**

(54) 発明の名称: 分布型光ファイバセンサシステム



15...RF SIGNAL SOURCE  
10...DISTRIBUTED OPTICAL FIBER SENSOR  
30...CONTROL OPERATION UNIT  
25...OSCILLATOR  
11...LIGHT SOURCE

**(S7) Abstract:** A distributed optical fiber sensor system capable of measuring the distortion and the temperature of a structure with high space resolution considering a transient phenomenon. The distributed optical fiber sensor system comprises an optical fiber installed in a work to be measured, a light source unit which emits a first pulse light of the pulse width of not smaller than a transient response time of acoustic phonon, emits a second pulse light continuously at a time interval where the vibration of

[統葉有]

**WO 2004/040241 A1**



---

the acoustic phonon is maintained, and feeds it to the optical fiber, a detection unit which detects the scattering gain spectrum of Brillouin scattering light generated in the optical fiber of the second pulse light at the time interval equivalent to twice the time obtained by equally dividing the pulse width of the second pulse, and a control operation unit which calculates the distortion and/or the temperature based on each scattering gain spectrum for each small section of the optical fiber corresponding to each scattering gain spectrum in each time interval.

(57) 要約: 本発明は、構造物の歪みや温度を高空間分解能に過渡現象を考慮して測定し得る分布型光ファイバセンサシステムに関する。本発明の分布型光ファイバセンサシステムは、被測定物に設置される光ファイバと、音響フォノンの過渡応答時間以上のパルス幅である第1パルス光を発光し、音響フォノンの振動が維持される時間間隔で続けて第2パルス光を発光して、光ファイバに供給する光源部と、第2パルス光の光ファイバ中で生じたブリルアン散乱光の散乱利得スペクトルを、第2パルスのパルス幅を等分割して得られる時間の2倍に相当する時間間隔で検出する検出部と、各時間間隔の各散乱利得スペクトルに対応する光ファイバの各微小区間について、各散乱利得スペクトルに基づいて歪み及び/又は温度を演算する制御演算部とを備える。

## 明 細 書

## 分布型光ファイバセンサシステム

## 技術分野

本発明は、橋、トンネル、建物等の構造物に生じた歪みや温度を光ファイバを用いて高空間分解能に過渡現象を考慮して測定し得る分布型光ファイバセンサシステムに関する。

## 背景技術

従来、光ファイバ中で生じるブリルアン散乱の周波数シフト量を光ファイバに沿って計測することにより歪み分布を計測する分布型光ファイバセンサや、光ファイバ中で生じるラマン散乱のストークス光と反ストークス光との光強度比を光ファイバに沿って計測することによって温度分布を計測する分布型光ファイバセンサが知られており、例えば、「次世代光テクノロジー集成」（オプトロニクス社）P 3 2 5～P 3 2 7に記載されている。これら分布型光ファイバセンサの空間分解能は、その測定方法から数mオーダーが限界であった。

そこで、本願発明の発明者は、サブcmオーダーの高空間分解能の分布型光ファイバセンサシステムをその発明者の一人として特願平11-150618号で提案し、この出願は、特開2000-074697号公報として開示された。

図23は、特開2000-074697号公報開示の分布型光ファイバセンサシステムの構成を示す図である。

図23において、この分布型光ファイバセンサシステム1000は、光ファイバ1002と、ポンプ光源1003と、プローブ光源1004と、光強度検出器1005と、光カプラ1006と、光フィルタ1007と、演算手段1008と、制御

手段1020とを備えて構成される。

歪みや温度を検出するセンサ部分である光ファイバ1002は、被測定物である構造物1001に設置される。この光ファイバ1002の一端からは、ポンプ光源1003から射出された不連続ポンプ光が光カプラ1006を介して入射され、他端からは、プローブ光源1004から射出された不連続プローブ光が入射される。不連続ポンプ光は、光ファイバ1002の非線形性等によってブリルアン散乱、ラマン散乱及びレーリ散乱等の各種散乱を生じさせる。生じた各種散乱は、不連続プローブ光と周波数が一致していると不連続プローブ光を増幅し、光カプラ1006によって光フィルタ1007に導かれる。光フィルタ1007は、これら各種散乱光等からブリルアン増幅された不連続プローブ光（ブリルアン散乱光）を主に透過させる。透過したブリルアン散乱光は、光強度検出器1005によってその光強度が検出され、検出結果は、演算手段1008に出力される。制御手段1020は、不連続プローブ光の周波数の設定、構造物1001の測定箇所での不連続プローブ光と不連続ポンプ光とが重なり合うようにプローブ光源1004及びポンプ光源1003の発光制御、及び、相互作用の結果生じたブリルアン散乱光を検出することができるように光強度検出器1005におけるサンプリングタイミングの制御等を行う。

演算手段1008は、光強度検出器1005の検出結果に基づき光ファイバ1002の歪みや温度を演算する。この演算において、分布型光ファイバセンサシステム1000は、不連続プローブ光と不連続ポンプ光とが重なり合う重合区間を更に複数の微小区間に分割することによって高空間分解能を達成していた。

ところで、ブリルアン散乱の原因となる音響フォノンは、機械波動であるため、瞬時に振動を始めることができず、過渡現象（transient phenomenon）が存在することが知られている（J. Smith, A. Brown, M. DeMerchant, X. Bao, "Pulse width dependence of the Brillouin loss Spectrum", Optical Communication, Vol. 168 (1999), P393-P398）。そのため、ブリルアン散乱を利用し

て歪みや温度をより正確に計測するためには、この過渡現象を考慮する必要がある。

本発明は、上記事情に鑑みて為された発明であり、ポンプ光を周波数が互いに異なる第1及び第2ポンプ光とすることにより過渡現象に対応した高空間分解能の分布型光ファイバセンサシステムを提供することを目的とする。

### 発明の開示

上述の目的を達成するために、本発明に係る分布型光ファイバセンサシステムは、被測定物に設置されるセンサ用の光ファイバと、音響フォノンの過渡応答時間以上のパルス幅である第1パルス光を発光すると共に、音響フォノンの振動が実質的に維持される時間間隔で前記第1パルス光に続けて第2パルス光を発光し、該第1及び第2パルス光を前記光ファイバに供給する光源と、前記第2パルス光によって前記光ファイバ中で生じたブリルアン散乱光の散乱利得スペクトルを、前記第2パルスのパルス幅を等分割して得られる時間の2倍に相当する時間間隔で検出する検出手段と、前記各時間間隔の各散乱利得スペクトルに対応する前記光ファイバの各微小区間について、前記各時間間隔の各散乱利得スペクトルに基づいて歪み及び／又は温度を演算する演算手段とを備えて構成される。

そして、上述の分布型光ファイバセンサシステムにおいて、前記検出手段は、所定の周波数の光と前記光ファイバからのブリルアン散乱光とを合波する光カプラと、前記光カプラから射出された光を受光して光電変換する受光器と、所定の周波数の電気信号を発振する発振器と、前記受光器の出力と前記発振器の出力とを合波するミキサと、前記ミキサの出力のうち所定の周波数帯域を透過するバンド・パス・フィルタと、前記バンド・パス・フィルタの出力を記憶するバッファと、前記散乱利得スペクトルが得られる範囲で前記発振器の所定の周波数を掃引する制御手段とを備えて構成される。さらに、このような分布型光ファイバセンサシステムにおいて、前記検出手段は、前記バッファに記憶されているバンド・パス・フィルタの2個

の出力を用いて、該2個の出力の間のデータを補間する補間手段をさらに備えることで構成される。

また、上述の分布型光ファイバセンサシステムにおいて、前記検出手段は、所定の周波数の光と前記光ファイバからのブリルアン散乱光とを合波する光カプラと、前記光カプラから射出された光を受光して光電変換する受光器と、前記受光器の出力のうち所定の周波数帯域を透過するバンド・パス・フィルタと、前記バンド・パス・フィルタの出力を時間・周波数解析する時間・周波数解析手段とを備えて構成される。

さらに、上述の分布型光ファイバセンサシステムにおいて、前記検出手段は、所定の周波数の光を前記第2パルス光と対向するように前記光ファイバに入射する入射手段と、前記所定の周波数の光と前記光ファイバからのブリルアン散乱光とを合波する光カプラと、前記光カプラから射出された光を受光して光電変換する受光器と、前記受光器の出力のうち所定の周波数帯域を透過するバンド・パス・フィルタと、前記バンド・パス・フィルタの出力を記憶するバッファと、前記散乱利得スペクトルが得られる範囲で前記光の所定の周波数を掃引する制御手段とを備えて構成される。そして、この分布型光ファイバセンサシステムにおいて、前記検出手段は、ヘテロダイン検波をするように前記所定の周波数の光の周波数を変換する光周波数変換手段を更に備えて構成される。また、これら分布型光ファイバセンサシステムにおいて、前記所定の周波数の光と前記ブリルアン散乱光とが前記光ファイバ中で複数回相互作用するように構成される。そして、このような分布型光ファイバセンサシステムにおいて、前記演算手段は、前記各時間間隔の各散乱利得スペクトルに対応する前記光ファイバの各微小区間について、前記各時間間隔の各散乱利得スペクトルに基づいて前記被測定物にかかる側圧をさらに演算することで構成される。

また、上述の分布型光ファイバセンサシステムにおいて、前記検出手段は、所定の周波数の光を2つに分配する第1光カプラと、前記第1光カプラで分配された一方の光を透過又は遮断する光スイッチと、前記光スイッチからの光と前記光ファイ

バからのブリルアン散乱光とを合波して2つに分配すると共に、分配した一方の光を前記光ファイバに入射させる第2光カプラと、前記第1光カプラで分配された他方の光と前記第2光カプラで分配された他方の光とを合波する第3光カプラと、前記第3光カプラから射出された光を受光して光電変換する受光器と、前記受光器の出力のうち所定の周波数帯域を透過するバンド・パス・フィルタと、前記バンド・パス・フィルタの出力を時間・周波数解析する時間・周波数解析手段とを備えて構成される。

このような分布型光ファイバセンサシステムは、第1パルス光を伝播させた後に、測定用のブリルアン散乱光を生じさせる第2パルス光を伝播させるので、測定用のブリルアン散乱光には過渡現象が生じない。このため、従来より正確に歪み及び温度を計測することができる。

#### 図面の簡単な説明

図1は、第1の実施形態における分布型光ファイバセンサシステムの構成を示す図である。

図2は、光周波数変換器から射出されるポンプ光を説明するための図である。

図3は、第1パルス光及び第2パルス光による音響フォノンの様子を説明するための図である。

図4は、各光の周波数関係を示す図である。

図5は、発振器の周波数とブリルアン散乱光のスペクトルとの関係を示す図である。

図6は、仮想的な微小空間と光ファイバとの関係を示す図である。

図7は、散乱利得スペクトルを示す図である。

図8は、第1の実施形態における分布型光ファイバセンサシステムの動作を示すフローチャートである。

図 9 は、S 1 7 における動作を示すフローチャートである。

図 1 0 は、2 次元ローパスフィルタの周波数特性を示す図である。

図 1 1 は、計測点と計測点から得た補間点との関係を示す図である。

図 1 2 は、パルス光が矩形の場合における式 3 の行列  $a(i, j)$  を示す図である。

図 1 3 は、C T 処理で使用されるフィルタの特性を示す図である。

図 1 4 は、第 2 の実施形態における分布型光ファイバセンサシステムの構成を示す図である。

図 1 5 は、時間・周波数解析部 4 4 の入力波形の一例を示す図である。

図 1 6 は、各タイム・ウィンドウにおける周波数スペクトルを示す図である。

図 1 7 は、第 2 の実施形態における分布型光ファイバセンサシステムの動作を示すフローチャートである。

図 1 8 は、第 3 の実施形態における分布型光ファイバセンサシステムの構成を示す図である。

図 1 9 は、第 4 の実施形態における分布型光ファイバセンサシステムの構成を示す図である。

図 2 0 は、第 5 の実施形態における分布型光ファイバセンサシステムの構成を示す図である。

図 2 1 は、第 5 の実施形態における物理過程を説明するための図である。

図 2 2 は、側圧を求める場合におけるフローチャートを示す図である。

図 2 3 は、特開 2 0 0 0 - 0 7 4 6 9 7 号公報開示の分布型光ファイバセンサシステムの構成を示す図である。

#### 発明を実施するための最良の形態

以下、本発明に係る実施形態を図面に基づいて説明する。なお、各図において



同一の構成については、同一の符号を付し、その説明を省略する。

(第1の実施形態の構成)

図1は、第1の実施形態における分布型光ファイバセンサシステムの構成を示す図である。

図1において、第1の実施形態における分布型光ファイバセンサシステム10は、光源11、光カプラ12、19、22、制御器13、光周波数変換器14、RF信号源15、光増幅器16、光アイソレータ17、偏光制御器18、光ファイバ21、受光器23、ミキサ24、発振器25、バンドパスフィルタ(BPF)26、増幅器27、アナログ/デジタル変換器(A/D)28、バッファ29及び制御演算部30を備えて構成される。

光源11は、歪みや温度を測定するために光ファイバ21にブリルアン散乱光の線幅より狭いスペクトル線幅の光を制御演算部30の制御の下に供給する。光源11は、例えば、分布帰還型半導体レーザ、分布ブラッグ反射型半導体レーザなど各種半導体レーザを利用することができる。本実施形態では、波長1550nm(その周波数を $f_0$ とおく。)のCW光を発光する半導体レーザを用いた。光カプラ12、19、22は、入射光を結合及び分岐して射出する部品である。なお、光カプラ19は、光サーキュレータを使用してもよい。

RF信号源15は、制御演算部30の制御の下にRF(radio frequency)周波数の電気信号を発生する。光周波数変換器14は、入射した光の周波数(波長)を所定の周波数に変換する部品であり、例えば、本実施形態の場合には、RF信号源15から供給される電気信号の周波数に応じて入射光の周波数を変換するSSB(single side band)-LN光変調器である。制御器13は、制御演算部30の制御下に、光周波数変換器14及びRF信号源15を制御することによって光周波数変換器14の入射光を所定の周波数、所定の期間及び所定のタイミングで射出する。光増幅器16は、入射光を所定の光強度まで増幅する部品であり、例えば、増幅する入射光の波長に合わせた希土類元素を添加した光ファイバ増幅器が用いられる。

波長 1500 nm 帯の光を増幅する場合には、希土類元素としてエルビウム (erbium、原子番号 68) 元素が使用される。光アイソレータ 17 は、光を一方向のみに透過させることを意図した部品である。

偏光制御器 18 は、制御演算部 30 の制御の下に、入射光の偏光面を所定の偏光面に変換して射出する部品である。光ファイバ 21 は、参照光ファイバ部 21-1 と検出光ファイバ部 21-2 との各部に分けられ、例えば、石英系の光ファイバである。参照光ファイバ部 21-1 は、被測定物に固定されないで配置され、検出光ファイバ部 21-2 は、橋、トンネル及び建物等の構造物 (被測定物) 1 の内部又は表面に固定される。なお、歪みを計測しないで温度のみを計測する場合には、必ずしも検出光ファイバ部 21-2 を固定する必要はない。

受光器 23 は、入射光の光強度を検出する部品であり、受光した光強度に応じた強度の電気信号に変換する。ミキサ 24 は、入力された複数の電気信号を合波して出力する。発振器 25 は、制御演算部 30 の制御の下に、所定の周波数  $f_1$  の電気信号を発振する。BPF 26 は、所定の周波数帯のみを透過するフィルタである。増幅器 27 は、入力信号を所定の振幅に増幅する。A/D 28 は、アナログ信号をデジタル信号に変換する。バッファ 29 は、A/D 28 の出力を一時的に記憶する。制御演算部 30 は、分布型光ファイバセンサシステム 10 の各部を制御すると共に、後述のように歪み及び温度を高空間分解能で演算する部品であり、例えば、マイクロプロセッサなどで構成されるパーソナル・コンピュータである。

次に、第 1 の実施形態における分布型光ファイバセンサシステム 10 の動作について説明する。

#### (第 1 の実施形態の動作)

まず、光源 11 から射出された CW レーザ光が分布型光ファイバセンサシステム 10 においてどのように作用するかについて説明する。

光源 11 から射出された周波数  $f_0$  の CW レーザ光は、光カプラ 12 のポート a に入射され、2 つに分配される。分配された一方のレーザ光は、ポート d から射出

され、光カプラ 2 2 のポート q に入射される。他方のレーザ光は、ポート c から射出され、光周波数変換器 1 4 に入射される。入射したレーザ光は、R F 信号源 1 5 の R F 周波数に従って光周波数変換器 1 4 で周波数が所定の周波数に調整され、かつ、制御器 1 3 によって光周波数変換器 1 4 の射出時間が調整される。

図 2 は、光周波数変換器から射出されるポンプ光を説明するための図である。図 2 の横軸は時間軸であり、縦軸は光強度である。

光カプラ 1 2 から光周波数変換器 1 4 に入射された C W レーザ光は、制御器 1 3 の制御信号及び R F 信号源 1 5 の R F 周波数に従って、パルス幅  $T_{w1}$  の第 1 パルス光とパルス幅  $T_{w2}$  の第 2 パルス光とに形成される。第 1 パルス光は、音響フォノンの運動を開始させ、かつ、安定化させるためのパルスであるので、そのパルス幅  $T_{w1}$  は、過渡応答が終了するだけの期間が必要である。過渡応答の継続時間は、光ファイバの材質、パルスの光強度などに応じて変化するが通常約 20 ns 程度である。そこで、例えば、本実施形態では、マージンを見込んで 100 ns に設定した。また、第 2 パルス光は、歪みや温度を計測するためのパルスであるので、そのパルス幅  $T_{w2}$  は、計測に必要な期間であれば良く ( $T_{w2} = d t \times m$ )、例えば、本実施形態では、30 ns に設定した。また、第 1 パルス光と第 2 パルス光との間隔  $T_{wr}$  は、第 1 パルス光の周波数から第 2 パルス光の周波数に変更するために要する期間であり、専ら制御器 1 3、光周波数変換器 1 4 及び R F 信号源の性能に左右される。第 1 パルス光の終了によって音響フォノンの振動が減衰を開始するので、この間隔  $T_{wr}$  は、短い程好ましい。例えば、本実施形態では、2 ns である。なお、この 2 ns では、音響フォノンの減衰は実質的に無いので、歪みや温度の計測に間隔  $T_{wr}$  の影響は実質的に生じない。

また、第 1 パルス光の周波数  $f_1$  と第 2 パルス光の周波数  $f_2$  は、光ファイバ 2 1 中でほぼ同様な音響フォノンを生じさせ、かつ、ミキサ 2 4 で発振器 2 5 の周波数  $f_e$  の電気信号で合波された結果 B P F 2 6 で効率良くフィルタリングすることが可能な周波数に設定される。例えば、本実施形態では、第 1 パルス光の周波数  $f$

1 は 12 GHz に設定され、第2パルス光の周波数  $f_2$  は 10.8 GHz に設定された。

光周波数変換器 14 から射出された第1パルス光及び第2パルス光は、光アイソレータ 17、偏光制御器 18、光カプラ 19、22 及び光ファイバ 21 における損失や各接続損失などを考慮して、検出光ファイバ部 21-2 で歪みや温度を計測するのに十分な非線形光学効果を生じさせる程度に、光増幅器 16 で増幅される。なお、本実施形態では、光増幅器 16 の出力を最大値 20 dBm にした。

増幅された第1パルス光及び第2パルス光は、光アイソレータ 17 を介して偏光制御器 18 で偏光面を調整され、光カプラ 19 の一方のポート e に入射される。光カプラ 19 のポート g から射出された第1パルス光及び第2パルス光は、光ファイバ 21 に入射される。

図3は、第1パルス光及び第2パルス光による音響フォノンの様子を説明するための図である。図3の横軸は光ファイバ 21 上の位置を示す。また、図3のA、B、C 及びDの各点は、図2に示すA'、B'、C' 及びD' の各点に対応する。

光ファイバ 21 では、第1パルス光及び第2パルス光によって図3に示す音響フォノンが生じる。第1パルス光の開始点A' が到達すると光ファイバ 21 中では振動が開始されるが(点A)、音響フォノンは瞬時に立ち上がることはできず、図3に示すように徐々に立ち上がる(点A～点S)。この過渡応答は、上記した通り通常約 20 ns であり、3 倍の 60 ns (点S) を経過すれば、音響フォノンは、充分安定状態に達すると考えられる。その後、第1パルス光の終了点B' が到達するまで安定状態が続く(点S～点B)。そして、第1パルス光が終了し第2パルス光が到達するまでの期間  $T_{wr}$  は、光がなくなるが、この期間  $T_{wr}$  は短いので、慣性により音響フォノンは、そのままの状態を維持する(点B～点C)。その後、第2パルス光の開始点C' が到達するが、既に音響フォノンは安定状態で振動しているので、過渡応答なく最初から安定な第2パルス光による音響フォノンが生じる。このため、第2パルス光によるブリルアン散乱は、安定に生じる。なお、第1パルス

光と第2パルス光とは、実質的にほぼ同じ音響フォノンを生じさせる。この安定状態は、第2パルス光の終了点D'が到達するまで継続する（点C～点D）。そして、第2パルス光が終了すると音響フォノンは徐々に減衰して基底状態に戻る（点D～点E）。なお、点Dにおいても安定的な音響フォノンを維持するために、第2パルス光の終了後に所定の時間間隔を空けて第2パルスと周波数の異なる第3パルスを光ファイバ21に入射してもよい。

光ファイバ21中の音響フォノンによって生じたブリルアン散乱光は、光カプラ19のポートgに入射され、ポートfから射出される。ポートfから射出されたブリルアン散乱光は、光カプラ22のポートrに入射される。ポートqから入射されたCWポンプ光とポートrから入射されたブリルアン散乱光は、光カプラ22で結合されて2つに分配される。

図4は、各光の周波数関係を示す図である。図4の横軸は周波数であり、縦軸は強度であるが、各光の周波数の相互関係を示すだけなので、その強度は実態とは異なる。

図4において、周波数 $f_0$ はCWポンプ光であり、周波数 $f_1$ は第1パルス光であり、周波数 $f_2$ は第2パルス光である。そして、周波数 $S_{b1}$ は第1パルス光によって生じたブリルアン散乱光の周波数であり、周波数 $S_{b2}$ は第2パルス光によって生じたブリルアン散乱光の周波数である。なお、 $f_1 - S_{b1} = f_2 - S_{b2} = f_B$ の関係にある。バンド幅 $B$ は受光器23の周波数バンドであり、 $\omega$ は受光器23の中心周波数であり、本実施形態では $B/2$ である。また、図4には、以下の説明と無関係であるので、ブリルアン散乱光の反ストークス光及びラマン散乱光は示されていない。

ここで、 $f_B$ は、10.5GHzの光ファイバを使用した場合には、光カプラ22における干渉（合波）により、 $f_1 - f_0 = 12\text{GHz}$ 、 $f_2 - f_0 = 10.8\text{GHz}$ （レーリー散乱光に対応する。）、 $f_1 - f_0 - f_B = 1.5\text{GHz}$ 、 $f_2 - f_0 - f_B = 0.3\text{GHz}$ （300MHz）となるので、バンド幅 $B$ を600M

H z 以下に選定すれば、第 2 パルス光によるブリルアン散乱光だけ受光器 2 3 から出力させることができる。このように本実施形態では、光源 1 1 の CW レーザ光を光カプラ 2 2 で相互作用させ、受光器 2 3 のバンド幅 B を適当に選定することにより、第 2 パルス光によるブリルアン散乱光に対応する出力を受光器 2 3 より得ている。受光器 2 3 のバンド幅 B は、変数 x の絶対値を  $abs[x]$  で表示するとすれば、上記より、

$$abs[f_1 - f_0 - f_B] \gg B > abs[f_2 - f_0 - f_B] \quad \dots (1)$$

が成立するように設定すればよい。

そして、分配された光は、受光器 2 3 に入力され、光電変換される。受光器 2 3 は、光源 1 1 で生じるノイズをキャンセルする観点から、例えば、本実施形態では、バランスド・レシーバ (balanced receiver、BR) を用いた。受光器 2 3 の出力は、ミキサ 2 4 で発振器 2 5 から入力される周波数  $f_e$  の正弦波電気信号を合波され、BPF 2 6 に入力される。例えば、本実施形態では、周波数  $f_e$  は 1.3 GHz に設定され、BPF 2 6 の透過特性は、中心周波数  $\omega_e$  が 1.0 GHz で透過周波数範囲が 1 MHz に設定された。

BPF 2 6 の出力は、所定のレベルまで増幅され、A/D 2 8 でアナログ信号からデジタル信号に変換される。そして、ブリルアン散乱光に応じた光強度  $P_s(t)$  に変換するためにさらに 2 乗される。

ここで、上述の場合において、A/D 2 8 のサンプリングレートを 5 GS に設定すれば、 $abs[f_e - \omega] = 1.0 \text{ GHz}$  においてもブリルアン散乱光による信号を記録することができる。

また、 $P_s(t)$  の s は、周波数を示し、図 4 の  $S_{b2}$  である。本実施形態では、 $s = S_{b2}$

$$= (f_2 - f_B) - f_0 + f_e \quad \dots (2)$$

である。この  $P_s(t)$  は、バッファ 2 9 に入力されて一時的に記憶される。

このようにして図 5 に斜線で示す周波数 s に対応するスペクトル  $P_{fe}$  が得られ

る。図5は、発振器の周波数とブリルアン散乱光のスペクトルとの関係を示す図である。図5の横軸は周波数であり、縦軸はブリルアン散乱光の強度である。

ここで、本実施形態では、1 GHzのRF振幅に整理するのであるから  $dt = 1 \text{ ns}$  であり、そのため  $P_s(t)$  は、第2パルス光が光ファイバ21中を  $1 \text{ ns}$  だけ伝播する間に生じるブリルアン散乱光の光強度である。一方、 $1 \text{ ns}$ の間に第2パルス光は、光速  $V = 200 \text{ mm/ns}$  であるから光ファイバ21中を  $dz = dt \times V / 2 = 10 \text{ cm}$  だけ伝播することとなり、結局、 $P_s(t)$  は、光ファイバ21における  $10 \text{ cm}$  おきのブリルアン散乱光の光強度となる。

従って、この  $P_s(t)$  を用いて後述のように演算すると、本実施形態では、 $10 \text{ cm}$  の空間分解能で光ファイバ21に生じる歪み及び温度を計測することができることになる。

次に、この歪み及び温度の演算方法について説明する。図6は、仮想的な微小空間と光ファイバとの関係を示す図である。

図6において、光ファイバ21の長尺方向に参照ファイバ部21-1の起点を座標原点とするZ軸を設定する。そして、参照光ファイバ21-1を  $m$  個の微小空間に分割し、検出ファイバ部21-2を  $n-1$  個の微小空間に分割する。また、第2パルスは、仮想的に微小時間  $dt$  の  $m$  個の区間に分割されているものとする。なお、本実施形態の場合には、上述より微小空間の長さは  $10 \text{ cm}$  となる。この場合において、ブリルアン散乱利得行列は、式3のように表される。

$$\begin{pmatrix} a(1,1) & a(1,2) & \cdots & a(1,m) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & a(2,2) & a(2,3) & \cdots & a(2,m+1) & \cdots & 0 \\ \vdots & & \ddots & & & & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & a(i,i) & a(i,i+1) & \cdots & a(i,i+n-1) & 0 \cdots 0 \\ \vdots & & & \ddots & & & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & a(n,n) & a(n,n+1) & \cdots & a(n,m+n-1) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} gs(1) \\ gs(2) \\ \vdots \\ gs(i) \\ \vdots \\ gs(m) \\ \vdots \\ gs(m+n-1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Qs(1) \\ Qs(2) \\ \vdots \\ Qs(i) \\ \vdots \\ Qs(n) \end{pmatrix}$$

... (3)

ここで、 $Q_s(i)$  ( $i$  は  $1 \leq i \leq n$  の整数) は、少なくとも、第2パルス光の設定周波数  $f_2$  における、図6に示す複数の微小区間  $z(i) \sim z(i+n-1)$  に関するブリルアン散乱光の光強度及び光ファイバ21に入射した第2パルス光の光強度によって決まる変数であり、 $g_s(j)$  は周波数  $s$  に対応する  $j$  番目の微小区間  $z(j)$  の散乱利得係数であり、 $a(i, j)$  は変数  $Q_s(i)$  に対する  $j$  番目の微小区間  $z(j)$  ( $j = i \sim (i+m-1)$ ) に関するブリルアン散乱光の光強度の割合を示す寄与率である。

$Q_s(i)$  は、第2パルスによるブリルアン散乱光の光強度と第2パルスの光ファイバ21中の伝播損失を考慮すると、式4のように表される。

$$Q_s(i) = \ln P_s(t_i) + \alpha L - \eta \quad \dots (4)$$

ここで、 $\alpha$  は光ファイバ21の減衰係数であり、 $L$  は光ファイバ21の長さである。 $\eta$  は定数であるが、簡単のために  $\eta = 0$  としてもよい。

そして、発振器25の周波数  $f_e$  を5MHz間隔で走査すると、ブリルアン散乱光のタイム・ドメイン・スペクトル (time domain spectra) を計測することができる。

さらに、或る区間  $i$  で式3及び式4を用いて得られた  $a(i, j)$  を周波数軸で表すと、当該区間  $i$  の散乱利得スペクトルを得ることができる。

図7は、散乱利得スペクトルを示すである。図7の横軸は周波数であり、縦軸は散乱利得係数である。図7の実線は計測した散乱利得スペクトルAであり、破線は参照光ファイバ部21-1における散乱利得スペクトルBである。 $\Delta g$  は、これら計測した散乱利得スペクトルAの最大値と参照光ファイバ部21-1における散乱利得スペクトルBの最大値との差であり、 $\Delta \nu$  は、計測した散乱利得スペクトルAの最大値を与える周波数と参照光ファイバ部21-1における散乱利得スペクトルBの最大値を与える周波数との差である。

当該区間  $i$  における歪み及び温度と参照光ファイバ部21-1における歪み及び



温度をそれぞれ、 $\varepsilon_i$ 、 $T_i$ 、 $\varepsilon_r$ 、 $T_r$ とおくと、式5が成り立つことが知られている。

$$\begin{pmatrix} \Delta \nu \\ \frac{\Delta g}{g_r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{\varepsilon \nu} & C_{T \nu} \\ C_{\varepsilon p} & C_{T p} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \varepsilon \\ \Delta T \end{pmatrix} \dots\dots (5)$$

ここで、 $\Delta \varepsilon = \varepsilon_r - \varepsilon_i$ 、 $\Delta T = T_r - T_i$ であり、 $g_r$ は参照ファイバ部21-1の最大利得係数、 $C_{\varepsilon \nu}$ 、 $C_{\varepsilon p}$ 、 $C_{T \nu}$ 及び $C_{T p}$ は光ファイバ21に固有な定数である。

このように計測結果を式3及び式4に用いて、図7に示す散乱利得係数シフト $\Delta g$ 及び周波数シフト $\Delta \nu$ を求めて、式5に用いることによって、微小区間 $z(i)$ における歪み $\varepsilon_i = \varepsilon_r + \Delta \varepsilon$ 及び温度 $T_i = T_r + \Delta T$ を求めることができる。

次に、分布型光ファイバセンサシステム10を用いて実際に歪み及び温度を計測する場合の動作について説明する。

図8は、第1の実施形態における分布型光ファイバセンサシステムの動作を示すフローチャートである。

まず、演算制御部30は、各部を初期化し、RF信号源15及び発信器25を作動させる等の初期設定を行う(S11)。次に、演算制御部30は、光周波数変換器14より上述した第1パルス光及び第2パルス光が射出されるように、制御器13を制御する(S12)。次に、演算制御部30は、光源11を作動させ、CWレーザ光を発光させる。発光したCWレーザ光は、上述したように制御器13及びRF信号源15によって、光周波数変換器14から第1パルス光及び第2パルス光となって射出される(S13)。射出された第1パルス光及び第2パルス光は、上述のように各部で作用し、第2パルス光によるブリルアン散乱光がサンプリングされ

る（S 1 4）。次に、このブリルアン散乱光のサンプリングが所定の期間に亘って行われることによって、検出光ファイバ部 2 1-2 の全長に亘ってサンプリングが行われる（S 1 5）。所定の期間は、光ファイバ 2 1 の全長を  $L$  とすれば、光が光ファイバ 2 1 を往復する時間であるから  $2L/V$  である。

次に、制御演算部 3 0 は、ブリルアン散乱光が発生すると予測される周波数範囲で、発振器 2 5 の周波数  $f_e$  を所定の周波数分だけずらしながら、S 1 2 乃至 S 1 5 を繰り返す（S 1 6）。こうして図 7 に示す計測した散乱利得スペクトル  $A$  を得るためのデータが光ファイバ 2 1 の各微小区間毎にそれぞれ得られる。

ここで、偏光による影響を抑制するために、制御演算部 3 0 は、偏光制御器 1 8 を制御することにより、第 1 及び第 2 パルス光の偏光面を所定の角度だけ回転させ、S 1 2 乃至 S 1 6 を繰り返し、図 7 に示す計測した散乱利得スペクトル  $A$  を得るための平均的なデータを得るようにしてもよい。これによって光ファイバ 2 1 における偏波効果が平均化され、より正確な特性曲線  $C$  が得られるので、歪みをより正確に計測することができる。

次に、制御演算部 3 0 は、バッファ 2 9 のデータを用いて各微小区間について歪み及び温度を高空間分解能で上述した式 3 乃至式 5 に基づき演算する（S 1 7）。

以上のように、本実施形態における分布型光ファイバセンサシステム 1 0 は、光ファイバ 2 1 を微小区間に仮想的に分割し、この微小区間におけるブリルアン散乱光に基づき歪み及び温度を演算するので、従来の分布型光ファイバセンサシステムに較べて高空間分解能で歪み及び温度を計測することができる。本実施形態の空間分解能は、光ファイバ中の光速とサンプリングレートとによって決まる。そして、本実施形態における分布型光ファイバセンサシステム 1 0 は、第 1 パルス光を伝播させた後に、測定用のブリルアン散乱光を生じさせる第 2 パルス光を伝播させるので、測定用のブリルアン散乱光には過渡現象が生じない。このため、より正確に歪み及び温度を計測することができる。

ここで、第 1 の実施形態の S 1 7 を改良することにより、さらに高分解能で歪み

及び温度を計測する手法について説明する。

図9は、S17における動作を示すフローチャートである。図10は、2次元ローパスフィルタの周波数特性を示す図である。図10(a)は、或る時間における2次元ローパスフィルタの周波数特性を示す図であり、図10(a)の横軸は周波数であり、縦軸は入出力比である。図10(b)は、或る周波数における2次元ローパスフィルタの周波数特性を示す図である。図10(b)の横軸は時間であり、縦軸は入出力比である。図11は、計測点と計測点から得た補間点との関係を示す図である。図12は、パルス光が矩形の場合における式3の行列 $a(i, j)$ を示す図である。図13は、CT処理で使用されるフィルタの特性を示す図である。

図9において、制御演算部30は、バッファ29の計測データを図10に示す周波数特性 $L_p$ を持つ2次元ローパスフィルタによってフィルタリングする(S31)。ここで、図10に示す遮断周波数 $\nu_c$ は、ブリルアン散乱の線幅に依存し、例えば35MHzの場合では100MHzである。次に、制御演算部30は、2点の計測データの間に於けるデータを例えば線形補間又は非線形補間によって所望数だけ補間する(S32)。図11では、2点の計測データ○の間に於ける2点のデータ□を線形補間によって補間した状況を示している。次に、制御演算部30は、図13に示す特性曲線を用いてCT処理フィルタリングを行う(S33)。そして、制御演算部30は、S31乃至S33の処理後のデータを用いて各微小区間について歪み及び温度を上述した式3乃至式5に基づき演算する(S34)。これによって、さらに高分解能で歪み及び温度を計測することができる。上述の補間では、 $A/D28$ で決まる計測データ○の間隔よりも三倍細かいデータ□間隔で高分解能で歪み及び温度を計測することができる。

次に、別の実施形態について説明する。

#### (第2の実施形態の構成)

第1の実施形態における分布型光ファイバセンサシステム10は、図8に示すS1

6において、所定の周波数範囲で繰り返しS12乃至S15の処理を行うことによって、図7に示す計測した散乱利得スペクトルAを得るためのデータを得ていたが、第2の実施形態における分布型光ファイバセンサシステム11は、時間・周波数解析手法（time-frequency analysis）を用いてデータを得る実施形態である。

図14は、第2の実施形態における分布型光ファイバセンサシステムの構成を示す図である。図14において、第2の実施形態における分布型光ファイバセンサシステム11は、光源11、光カプラ12、19、22、制御器13、光周波数変換器14、RF信号源15、光増幅器16、光アイソレータ17、偏光制御器18、光ファイバ21、受光器23、BPF41、増幅器42、A/D43、時間・周波数解析部44及び制御演算部45を備えて構成される。

次に、第2の実施形態における分布型光ファイバセンサシステム11の動作について説明する。

#### （第2の実施形態の動作）

光源11から射出された周波数 $f_0$ のCWレーザ光は、光カプラ12を介して光周波数変換器14に入射される。入射したCWレーザ光は、光周波数変換部14で周波数 $f_1 = 5\text{ GHz}$ 、パルス幅 $100\text{ ns}$ の第1パルス光と、 $2\text{ ns}$ の時間間隔を空けて、周波数 $f_2 = 10.3\text{ GHz}$ 、パルス幅 $30\text{ ns}$ の第2パルス光に変換され、光増幅器16に入射される。その後、これら第1及び第2パルス光は、第1の実施形態と同様に作用しながら、光増幅器16、光アイソレータ17、偏光制御器18及び光カプラ19を介して光ファイバ21に入射される。

光ファイバ21中で第2パルス光によって生じたブリルアン散乱光は、光カプラ19を介して光カプラ22のポートrに入射される。ポートqから入射されたCWレーザ光とポートrから入射されたブリルアン散乱光は、光カプラ22で結合されて2つに分配され、それぞれ受光器23に入射される。

ここで、 $f_B$ は、 $10.7\text{ GHz}$ の光ファイバを使用した場合には、光カプラ22における干渉（合波）により、 $f_1 - f_0 = 5\text{ GHz}$ 、 $f_2 - f_0 = 10.7\text{ GHz}$

Hz（レーリー散乱光に対応する。）、 $f_1 - f_0 - f_B = 5.7 \text{ GHz}$ 、 $f_2 - f_0 - f_B = 0.4 \text{ GHz}$ （400 MHz）となるので、バンド幅Bを2 GHz以下に選定すれば、第2パルス光によるブリルアン散乱光だけ受光器23から出力させることができる。受光器23のバンド幅Bは、第1の実施形態と同様に式1が成立するように設定する。

そして、分配された光は、受光器23に入力され、光電変換される。受光器23の出力は、BPF41に入力される。例えば、本実施形態では、BPF41の透過特性は、中心周波数が300 MHzで透過周波数範囲が400 MHzに設定された。このため、BPF41の出力は、最大周波数が500 MHz、最小周波数が100 MHzとなる。

BPF41の出力は、増幅器42で所定のレベルまで増幅され、A/D43でアナログ信号からデジタル信号に変換される。ここで、上述の場合において、A/D43のサンプリングレートを $4 \times 500 = 2000 \text{ MS}$ 以上に設定する。本実施形態では、8 GSに設定された。そして、A/D43の出力は、時間・周波数解析部44に入力される。

図15は、時間・周波数解析部44の入力波形の一例を示す図である。図15の横軸は時間であり、縦軸は振幅である。また、図16は、各タイム・ウィンドウにおける周波数スペクトルを示す図である。図16のx軸は時間を示し、y軸は周波数を示し、z軸は強度を示す。

時間・周波数解析部44は、図15に示すように一定期間Tのタイム・ウィンドウ（time-window）W1を設定し、このタイム・ウィンドウW1中のデータに対してフーリエ変換を行うことにより、周波数スペクトルS<sub>pw1</sub>を求める。そして、タイム・ウィンドウW1をタイム・ウィンドウW2、タイム・ウィンドウW3、・・・のように一定時間dwだけ順次にずらすことによって、図16に示すように各時間における周波数スペクトルS<sub>pw2</sub>、S<sub>pw3</sub>、・・・をリアルタイムで求める。ここで、S<sub>pw2</sub>は、S<sub>pw1</sub>に対して時刻（T+dw）/2の周波数

スペクトルとなっている。

例えば、本実施形態では、一定期間  $T$  は  $400\text{ ns}$  に設定され、この期間  $T$  中において  $3200$  個のデータを得て、フーリエ変換を行い周波数スペクトルを求める。また一定時間  $dw$  は  $10\text{ ns}$  に設定され、各時刻における周波数スペクトルが求められる。

このような時間・周波数解析部 44 としては、例えば、リアルタイム・スペクトラム・アナライザなどがある。また、本実施形態では、各時刻における周波数スペクトルを求める手法として、時間・周波数解析法を用いたが、ウェーブレット変換法も用いることができる。

そして、制御演算部 45 は、時間・周波数解析部 44 で求めた各時刻における周波数スペクトルを用いて、第 1 の実施形態と同様に、式 3 乃至式 5 を用いて  $10\text{ cm}$  の空間分解能で光ファイバ 21 に生じる歪み及び温度を計測する。

次に、分布型光ファイバセンサシステム 11 を用いて実際に歪み及び温度を計測する場合の動作について説明する。

図 17 は、第 2 の実施形態における分布型光ファイバセンサシステムの動作を示すフローチャートである。

図 17 において、まず、演算制御部 45 は、各部を初期化し、RF 信号源 15 を作動させる等の初期設定を行う (S21)。次に、演算制御部 45 は、光周波数変換器 14 より上述した第 1 パルス光及び第 2 パルス光が射出されるように、制御器 13 を制御する (S22)。次に、演算制御部 45 は、光源 11 を作動させ、CW レーザ光を発光させ、光周波数変換器 14 より第 1 パルス光及び第 2 パルス光を射出させる (S23)。射出された第 1 パルス光及び第 2 パルス光は、上述のように各部で作用し、第 2 パルス光によるブリルアン散乱光がサンプリングされる (S24)。次に、このブリルアン散乱光のサンプリングが所定の期間に亘ってサンプリングされることによって、検出光ファイバ部 21-2 の全長に亘ってサンプリングが行われる (S25)。

このようにして各微小区間毎に図 1 6 に示すような周波数スペクトル、即ち、散乱利得スペクトルを得るためのデータが得られる。次に、制御演算部 4 5 は、時間・周波数解析部 4 4 のデータを用いて各微小区間について歪み及び温度を高空間分解能で上述した式 3 乃至式 5 に基づき演算する（S 2 6）。

以上のように、本実施形態における分布型光ファイバセンサシステム 1 1 は、第 1 の実施形態における分布型光ファイバセンサシステム 1 0 の効果に加えてさらに、データ取得に時間・周波数解析の手法を用いるから、第 1 の実施形態のように周波数走査をしないで済むので、計測時間を短くすることができ、しかも、リアルタイムで計測することができる。よって、動的に歪み及び温度が変化する測定対象でも計測可能となる。

次に、別の実施形態について説明する。

#### （第 3 の実施形態）

第 3 の実施形態における分布型光ファイバセンサシステムは、第 1 及び第 2 パルス光から成るポンプ光と、第 1 及び第 2 パルス光の進行方向に対向するようにプローブ光とを光ファイバに入射し、第 2 パルス光によるブリルアン散乱によってプローブ光を増幅し、ブリルアン増幅されたプローブ光（ブリルアン散乱光）を検出することによって歪み及び温度を求める実施形態である。

図 1 8 は、第 3 の実施形態における分布型光ファイバセンサシステムの構成を示す図である。

図 1 8 において、第 3 の実施形態における分布型光ファイバセンサシステム 1 2 は、光源 1 1、光カプラ 1 2、1 9、2 2、5 1、制御器 1 3、光周波数変換器 1 4、RF 信号源 1 5、光増幅器 1 6、光アイソレータ 1 7、偏光制御器 1 8、光ファイバ 2 1、受光器 2 3、LPF 5 2'、増幅器 5 3、A/D 5 4、バッファ 5 5 及び制御演算部 5 6 を備えて構成される。

次に、第 3 の実施形態における分布型光ファイバセンサシステム 1 2 の動作について説明する。

## (第3の実施形態の動作)

光源11から射出された周波数 $f_0$ のCWレーザ光は、光カプラ12を介して光周波数変換器14に入射される。入射したCWレーザ光は、光周波数変換部14で周波数 $f_1 = 12\text{ GHz}$ 、パルス幅 $100\text{ ns}$ の第1パルス光と、 $2\text{ ns}$ の時間間隔を空けて、周波数 $f_2 = 10.8\text{ GHz}$ 、パルス幅 $30\text{ ns}$ の第2パルス光に変換され、光増幅器16に入射される。その後、これら第1及び第2パルス光は、第1の実施形態と同様に作用しながら、光増幅器16、光アイソレータ17、偏光制御器18及び光カプラ19を介して光ファイバ21の一方端に入射される。

一方、光カプラ12で分配されポートdから射出されたCWレーザ光は、光カプラ51のポートjに入射され、2つに分配される。分配された一方は、ポートlから射出され、光カプラ22のポートqに入射される。そして、分配された他方は、ポートkから射出され、光ファイバ21の他方端に入射される。この光ファイバ21の他方端から入射されたCWレーザ光がプローブ光となる。

光ファイバ21中で第2パルス光のブリルアン散乱によって増幅されたプローブ光（ブリルアン散乱光）は、光カプラ19を介して光カプラ22のポートrに入射される。ポートqから入射されたCWレーザ光とポートrから入射されたブリルアン散乱光は、光カプラ22で結合されて2つに分配され、それぞれ受光器23に入射される。即ち、ホモダイン（homodyne）検波となる。

ここで、 $f_B$ は、 $10.5\text{ GHz}$ の光ファイバを使用した場合には、光カプラ22における干渉（合波）により、 $f_1 - f_0 = 12\text{ GHz}$ 、 $f_2 - f_0 = 10.8\text{ GHz}$ 、 $f_1 - f_0 - f_B = 1.5\text{ GHz}$ 、 $f_2 - f_0 - f_B = 0.3\text{ GHz}$ （ $300\text{ MHz}$ ）となるので、バンド幅 $B$ を $1\text{ GHz}$ に選定すれば、第2パルス光によるブリルアン散乱光だけ受光器23から出力させることができる。受光器23のバンド幅 $B$ は、第1の実施形態と同様に式1が成立するように設定する。

そして、分配された光は、受光器23に入力され、光電変換される。受光器23の出力は、LPF52'に入力される。例えば、本実施形態では、LPF52'の



透過特性は、透過周波数範囲が100MHzに設定された。

LPF52'の出力は、増幅器52で所定のレベルまで増幅され、A/D54でアナログ信号からデジタル信号に変換される。ここで、上述の場合において、A/D54のサンプリングレートを1600MS以上に設定する。RF信号の強度に換算する。本実施形態では、2GSに設定された。バッファ55は、A/D54の出力を一時的に記憶する。制御演算部30は、分布型光ファイバセンサシステム10の各部を制御すると共に、バッファ55のデータを用いて第1の実施形態と同様に、式3乃至式5によって5cmの空間分解能で光ファイバ21に生じる歪み及び温度を計測する。

なお、分布型光ファイバセンサシステム12を用いて実際に歪み及び温度を計測する場合の動作は、図8に示す第1の実施形態における分布型光ファイバセンサシステム11の動作と同様なので、その説明を省略する。

以上のように、本実施形態における分布型光ファイバセンサシステム12は、第1の実施形態における分布型光ファイバセンサシステム10の効果に加えてさらに、プローブ光を用いるので、より強い信号光が得られ、計測距離をより長距離化することができる。

次に、別の実施形態について説明する。

#### (第4の実施形態)

第3の実施形態における分布型光ファイバセンサシステム12は、ホモダイン検波によりブリルアン散乱光を検出したが、第4の実施形態における分布型光ファイバセンサシステム13は、ヘテロダイン(heterodyne)検波によりブリルアン散乱光を検出する実施形態である。

図19は、第4の実施形態における分布型光ファイバセンサシステムの構成を示す図である。図19において、第4の実施形態における分布型光ファイバセンサシステム13は、光源11、光カップラ12、19、22、51、制御器13、光周波数変換器14、57、RF信号源15、光増幅器16、光アイソレータ17、偏光

制御器 18、光ファイバ 21、受光器 23、BPF 52、増幅器 53、A/D 54、バッファ 55 及び制御演算部 56 を備えて構成される。

次に、第 4 の実施形態における分布型光ファイバセンサシステム 12 の動作について説明する。

#### (第 4 の実施形態の動作)

光源 11 から射出された周波数  $f_0$  の CW レーザ光は、光カプラ 12 を介して光周波数変換器 14 に入射される。入射した CW レーザ光は、光周波数変換部 14 で周波数  $f_1 = 12 \text{ GHz}$ 、パルス幅  $100 \text{ ns}$  の第 1 パルス光と、 $2 \text{ ns}$  の時間間隔を空けて、周波数  $f_2 = 10.8 \text{ GHz}$ 、パルス幅  $30 \text{ ns}$  の第 2 パルス光に変換され、光増幅器 16 に入射される。その後、これら第 1 及び第 2 パルス光は、第 1 の実施形態と同様に作用しながら、光増幅器 16、光アイソレータ 17、偏光制御器 18 及び光カプラ 19 を介して光ファイバ 21 の一方端に入射される。

一方、光カプラ 12 で分配されポート d から射出された CW レーザ光は、光カプラ 51 のポート j に入射され、2 つに分配される。分配された一方は、ポート l から射出され、光周波数変換部 57 で所定の周波数 ( $f_{ao}$ ) に変換され、光カプラ 22 のポート q に入射される。そして、分配された他方は、ポート k から射出され、光ファイバ 21 の他方端に入射される。この光ファイバ 21 の他方端から入射された CW レーザ光がプローブ光となる。

光ファイバ 21 中で第 2 パルス光のブリルアン散乱によって増幅されたプローブ光 (ブリルアン散乱光) は、光カプラ 19 を介して光カプラ 22 のポート r に入射される。ポート q から入射された所定の周波数の CW レーザ光とポート r から入射されたブリルアン散乱光は、光カプラ 22 で結合されて 2 つに分配され、それぞれ受光器 23 に入射される。所定の周波数 ( $f_{ao}$ ) は、 $120 \text{ MHz}$  に設定されるので、ヘテロダイン検波となる。

そして、分配された光は、受光器 23 に入力され、光電変換される。受光器 23 の出力は、BPF 52 に入力される。例えば、本実施形態では、BPF 52 の透過

特性は、中心周波数が120MHzで透過周波数範囲が1MHzに設定された。

BPF52の出力は、増幅器52で所定のレベルまで増幅され、A/D54でアナログ信号からデジタル信号に変換される。ここで、上述の場合において、A/D54のサンプリングレートを500MS以上に設定する。本実施形態では、1GSに設定された。そして、A/D54の出力は、バッファ55に一時的に記憶される。制御演算部30は、分布型光ファイバセンサシステム10の各部を制御すると共に、バッファ55のデータを用いて第1の実施形態と同様に、式3乃至式5によって10cmの空間分解能で光ファイバ21に生じる歪み及び温度を計測する。

なお、分布型光ファイバセンサシステム13を用いて実際に歪み及び温度を計測する場合の動作は、図8に示す第1の実施形態における分布型光ファイバセンサシステム11の動作と同様なので、その説明を省略する。

以上のように、本実施形態における分布型光ファイバセンサシステム13は、第1の実施形態における分布型光ファイバセンサシステム10の効果に加えてさらに、プローブ光を用いるので、測定範囲の長距離化や高精度化を図ることができる。

次に、別の実施形態について説明する。

#### (第5の実施形態)

第5の実施形態における分布型光ファイバセンサシステムは、第2パルス光によるブリルアン散乱光をループさせることによって増幅し、増幅されたブリルアン散乱光を検出することによって歪み及び温度を求める実施形態である。

図20は、第5の実施形態における分布型光ファイバセンサシステムを示す図であり、図20(a)はその構成を示し、図20(b)は光ゲートスイッチの動作及び光周波数変換器の動作を示すタイミングチャートである。図21は、第5の実施形態における物理過程を説明するための図である。

図20(a)において、第5の実施形態における分布型光ファイバセンサシステム14は、光源11、光カプラ12、19、22、61、64、制御器13、光周波数変換器14、57、RF信号源15、光増幅器16、63、光アイソレータ1

7、偏光制御器 18、光ファイバ 21、受光器 23、光ゲートスイッチ 62、BPF 65、増幅器 66、A/D 67、バッファ 68 及び制御演算部 69 を備えて構成される。光ゲートスイッチ 62 は、入射光を制御信号に応じて透過（オン）又は遮断（オフ）する光スイッチである。

次に、第 5 の実施形態における分布型光ファイバセンサシステム 14 の動作について説明する。

#### （第 5 の実施形態の動作）

光源 11 から射出された周波数  $f_0$  の CW レーザ光は、光カップラ 12 を介して光周波数変換器 14 に入射される。入射した CW レーザ光は、光周波数変換部 14 で周波数  $f_1 = 12 \text{ GHz}$ 、パルス幅  $100 \text{ ns}$  の第 1 パルス光と、 $2 \text{ ns}$  の時間間隔を空けて、周波数  $f_2 = 10.8 \text{ GHz}$ 、パルス幅  $30 \text{ ns}$  の第 2 パルス光に変換され、図 20 (b) に示すタイミングで光増幅器 16 に入射される。その後、これら第 1 及び第 2 パルス光は、第 1 の実施形態と同様に作用しながら、光増幅器 16、光アイソレータ 17、偏光制御器 18 及び光カップラ 19 を介して光ファイバ 21 の一方端に入射される。

一方、光カップラ 12 で分配されポート d から射出された CW レーザ光は、光カップラ 61 のポート n に入射され、2 つに分配される。分配された一方は、ポート o から射出され、図 20 (b) に示すタイミングで光ゲートスイッチ 62 を介して光カップラ 64 のポート v に入射される。光カップラ 61 で分配された他方は、ポート p から射出され、光周波数変換部 57 で所定の周波数に変換され、光カップラ 22 のポート q に入射される。

また、光カップラ 64 のポート v に入射された CW レーザ光は、ポート w から射出され、光ファイバ 21 の他方端に入射される。この光ファイバ 21 の他方端から入射された CW レーザ光がプローブ光となる。一方、光ファイバ 21 中で第 2 パルス光のブリルアン散乱によって増幅されたプローブ光（ブリルアン散乱光）は、光カップラ 19 のポート f から射出され、光増幅器 63 で所定のレベルに増幅され、光カ

ブラ 6 4 のポート u に入射される。ポート u に入射したブリルアン散乱光は、光カブラ 6 4 で分配され、ポート w から射出されたブリルアン散乱光は、光ファイバ 2 1 の他方端に入射される。こうして光ゲートスイッチ 6 2 から射出された CW レーザ光（プローブ光）は、光カブラ 6 4 → 光ファイバ 2 1 → 光カブラ 1 9 → 光増幅器 6 3 → 光カブラ 6 4 のループを所定回数だけ周回する。その周回の間に、光周波数変換器 1 4 から射出された第 1 及び第 2 パルスは、この周回するプローブ光に対し同じタイミングで相互作用するように制御演算部 6 9 の制御によって、図 2 0 (b) に示す如く周回時間  $T_{\text{Loop}}$  ごとに光周波数変換器 1 4 から射出する。ループを所定回数だけ周回することにより光ファイバ 2 1 中で繰り返し相互作用するため、光ファイバ 2 1 の歪みや温度をより反映した状態になると共に、第 2 パルスとプローブ光との偏光状態が平均化される。そのため、ダイナミックに変化する歪み変化や温度変化にも対応することができる。

一方、カブラ 6 4 で分配された他方のブリルアン散乱光は、カブラ 2 2 のポート r に入射される。ポート q から入射された CW レーザ光とポート r から入射されたブリルアン散乱光は、光カブラ 2 2 で結合されて 2 つに分配され、それぞれ受光器 2 3 に入射され、光電変換される。ここで、ブリルアン散乱光が所定回数、例えば、40 回ループを周回したタイミングで制御演算部 6 9 の制御により受光器 2 3 の出力が BPF 6 5 に出力される。

ここで、 $f_B$  は、10.5 GHz の光ファイバを使用した場合には、光カブラ 2 2 における干渉（合波）により、 $f_1 - f_0 = 12 \text{ GHz}$ 、 $f_2 - f_0 = 10.8 \text{ GHz}$ 、 $f_1 - f_0 - f_B = 1.5 \text{ GHz}$ 、 $f_2 - f_0 - f_B = 0.3 \text{ GHz}$ （300 MHz）となるので、中心周波数が 120 MHz で透過周波数範囲が 1 MHz に選定すれば、第 2 パルス光によるブリルアン散乱光だけ受光器 2 3 から出力させることができる。

BPF 6 5 の出力は、増幅器 6 6 で所定のレベルまで増幅され、A/D 6 7 でアナログ信号からデジタル信号に変換される。ここで、上述の場合において、A/

D 6 7 のサンプリングレートを 4 0 0 M S 以上に設定する。そして、図 9 を用いて説明した手順によれば、実質的に 2 0 0 0 M S に補間される。本実施形態では、2 G S に設定された。バッファ 5 5 は、A / D 5 4 の出力を一時的に記憶する。制御演算部 3 0 は、分布型光ファイバセンサシステム 1 0 の各部を制御すると共に、バッファ 5 5 のデータを用いて第 1 の実施形態と同様に、式 3 乃至式 5 によって 5 c m の空間分解能で光ファイバ 2 1 に生じる歪み及び温度を計測する。

ここで、式 3 における  $Q_s(i)$  は、次のようにして求められる。図 2 1 において、光ファイバ部 2 1 の長尺方向に参照光ファイバ部 2 1-1 の起点を座標原点とする Z 軸を設定する。また、図 2 1 の  $D_L$  は、光カプラ 6 4 → 光ファイバ 2 1 → 光カプラ 1 9 → 光増幅器 6 3 → 光カプラ 6 4 のループにおける損失をまとめて代表させたものである。k 回目に  $Z=L$  から入射して周回するプローブ光は、式 6 のように表される。

$$\ln P_p(0)^{(k)} = - \int_{Z_0}^{Z_0} R^{(k)}(Z) \gamma(Z, S) S_s(Z) dZ - \alpha_p L + \ln P_p(L)^{(k-1)} \dots\dots (6)$$

ここで、 $P_s^{(k)}(z)$  は k 回目 z 位置における周波数 s のプローブ光強度を示す。 $R^{(k)}(z)$  は、k 回目 z 位置における第 2 パルス光とプローブ光との偏波係数を示し、シングルモード光ファイバにおいては 0 から 1 までの乱数である。 $\gamma(z, s)$  は位置 z における周波数 s に対するブリルアン増幅係数であり、基本的に波長が決まると歪み及び温度に依存する。 $\alpha_s$  は光ファイバ 2 1 の減衰係数であり、 $S_p(z)$  は第 2 パルス光のエネルギー密度であり、式 7 のように表される。

$$S_p(Z) = \frac{P_s(Z)}{A_{eff}} \dots\dots (7)$$

ここで、 $A_{eff}$  は、光ファイバ 21 の有効断面積である。また、図 21 より式 8 が成立する。

$$P_s^{(k-1)}(L) = D L G E^{(k-1)} P_s^{(k-2)}(0) \quad \dots\dots (8)$$

以上、式 6 乃至式 8 をまとめて、検出光ファイバ部 21-2 を長さ  $dz$  の複数の微小区間に等分割して差分方程式で整理すると、式 9 乃至式 12 にまとめることができる。

$$\sum_{j=0}^{j0} a_{ij} R_i^k r_{j,s} = Q_{i,s}^k \quad \dots\dots (9)$$

$$a_{ij} = \frac{P_s^j dz}{A_{eff}} \exp(-\alpha_p Z_j) \quad \dots\dots (10)$$

$$R_i^k = \frac{\sum_{nk=1}^k R_j^{(nk)}}{k-1} \quad \dots\dots (11)$$

$$Q_{i,s}^k = \frac{1}{k-1} \ln\left(\frac{P_s^0}{P_s^{(k)}(L)}\right) - \alpha_s L \frac{k-2}{k-1} \ln(\beta) \quad \dots\dots (12)$$

ここで、添え字  $i, j$  は微小区間の番号である。式 11 から分かるように、 $R_j^k$

は、乱数の平均値であるから、周回数  $k$  を大きくすると各微小区間の値は同じ定数で近似することができる。

以上のように、本実施形態における分布型光ファイバセンサシステム 14 は、第 1 の実施形態における分布型光ファイバセンサシステム 10 の効果に加えてさらに、ブリルアン散乱光をループさせるので、光ファイバ 21 の歪みや温度をより反映した状態になると共に、第 2 パルスとプローブ光との偏光状態が平均化される。そのため、ダイナミックに変化する歪み変化や温度変化にも対応することができる。

一方、上述の第 1 乃至第 5 の実施形態において、構造物 1 に側圧がかかると同時に光ファイバ 21 にも側圧がかかり、光ファイバ 21 の径方向に歪みが生じる。この径方向の歪みは、様々な偏光に対する平均な散乱利得スペクトル（平均散乱利得スペクトル）と或る特定の偏光に対する散乱利得スペクトル（特定散乱利得スペクトル）とを比較することによって各微小区間の側圧を求めることができる。

図 22 は、側圧を求める場合におけるフローチャートを示す図である。図 22 において、まず、偏光制御器 18 の偏光面を適当な偏光面に調整し（S41）、図 8 を用いて説明した S12 乃至 S16 により、散乱利得スペクトルを求める（S42）。平均を求めるのに適当な所定回数だけ偏光偏を変えながら S41 及び S42 を繰り返し（S43）、所定回数だけ繰り返したら、各偏光面に対する散乱利得スペクトルを平均することによって平均散乱利得スペクトルを求める（S44）。

次に、偏光制御器 18 の偏光面を或る特定の偏光面に維持し（S45）、S12 乃至 S16 によりこの特定の偏光面に対する散乱利得スペクトル（特定散乱利得スペクトル）を求める（S46）。平均散乱利得スペクトルと特定散乱利得スペクトルとから偏光係数を求め、側圧を求める（S47）。

このように第 1 乃至第 5 の実施形態における分布型光ファイバセンサを利用することによって光ファイバ 21 の径方向に生じた歪みも測定することができる。



### 産業上の利用可能性

以上のように、本発明に係る分布型光ファイバセンサシステムは、第1パルス光を伝播させた後に、測定用のブリルアン散乱光を生じさせる第2パルス光を伝播させるので、測定用のブリルアン散乱光には過渡現象が生じない。このため、従来より正確に歪み及び温度を計測することができる。

## 請求の範囲

(1) 被測定物に設置されるセンサ用の光ファイバと、

音響フォノンの過渡応答時間以上のパルス幅である第1パルス光を発光すると共に、音響フォノンの振動が実質的に維持される時間間隔で前記第1パルス光に続けて第2パルス光を発光し、該第1及び第2パルス光を前記光ファイバに供給する光源と、

前記第2パルス光によって前記光ファイバ中で生じたブリルアン散乱光の散乱利得スペクトルを、前記第2パルスのパルス幅を等分割して得られる時間の2倍に相当する時間間隔で検出する検出手段と、

前記各時間間隔の各散乱利得スペクトルに対応する前記光ファイバの各微小区間について、前記各時間間隔の各散乱利得スペクトルに基づいて歪み及び／又は温度を演算する演算手段とを備えたこと

を特徴とする分布型光ファイバセンサシステム。

(2) 前記検出手段は、

所定の周波数の光と前記光ファイバからのブリルアン散乱光とを合波する光カプラと、

前記光カプラから射出された光を受光して光電変換する受光器と、

所定の周波数の電気信号を発振する発振器と、

前記受光器の出力と前記発振器の出力とを合波するミキサと、

前記ミキサの出力のうち所定の周波数帯域を透過するバンド・パス・フィルタと

前記バンド・パス・フィルタの出力を記憶するバッファと、

前記散乱利得スペクトルが得られる範囲で前記発振器の所定の周波数を掃引する制御手段と備えること

を特徴とする請求の範囲1に記載の分布型光ファイバセンサシステム。

(3) 前記検出手段は、前記バッファに記憶されているバンド・パス・フィルタの 2 個の出力を用いて、該 2 個の出力の間のデータを補間する補間手段をさらに備えること

を特徴とする請求の範囲 2 に記載の分布型光ファイバセンサシステム。

(4) 前記検出手段は、

所定の周波数の光と前記光ファイバからのブリルアン散乱光とを合波する光カップラと、

前記光カップラから射出された光を受光して光電変換する受光器と、

前記受光器の出力のうち所定の周波数帯域を透過するバンド・パス・フィルタと

、  
前記バンド・パス・フィルタの出力を時間・周波数解析する時間・周波数解析手段とを備えること

を特徴とする請求の範囲 1 に記載の分布型光ファイバセンサシステム。

(5) 前記検出手段は、

所定の周波数の光を前記第 2 パルス光と対向するように前記光ファイバに入射する入射手段と、

前記所定の周波数の光と前記光ファイバからのブリルアン散乱光とを合波する光カップラと、

前記光カップラから射出された光を受光して光電変換する受光器と、

前記受光器の出力のうち所定の周波数帯域を透過するバンド・パス・フィルタと

、  
前記バンド・パス・フィルタの出力を記憶するバッファと、

前記散乱利得スペクトルが得られる範囲で前記光の所定の周波数を掃引する制御手段とを備えること

を特徴とする請求の範囲 1 に記載の分布型光ファイバセンサシステム。

(6) 前記検出手段は、ヘテロダイン検波をするように前記所定の周波数の光の

周波数を変換する光周波数変換手段を更に備えることを

を特徴とする請求の範囲 5 に記載の分布型光ファイバセンサシステム。

(7) 前記所定の周波数の光と第 2 パルス光とが前記光ファイバ中で複数回相互作用するように構成したこと

を特徴とする請求の範囲 5 又は請求の範囲 6 に記載の分布型光ファイバセンサシステム。

(8) 前記演算手段は、

前記各時間間隔の各散乱利得スペクトルに対応する前記光ファイバの各微小区間について、前記各時間間隔の各散乱利得スペクトルに基づいて前記被測定物にかかる側圧をさらに演算すること

を特徴とする請求の範囲 7 に記載の分布型光ファイバセンサシステム。

(9) 前記検出手段は、

所定の周波数の光を 2 つに分配する第 1 光カプラと、

前記第 1 光カプラで分配された一方の光を透過又は遮断する光スイッチと、

前記光スイッチからの光と前記光ファイバからのブリルアン散乱光とを合波して 2 つに分配すると共に、分配した一方の光を前記光ファイバに入射させる第 2 光カプラと、

前記第 1 光カプラで分配された他方の光と前記第 2 光カプラで分配された他方の光とを合波する第 3 光カプラと、

前記第 3 光カプラから射出された光を受光して光電変換する受光器と、

前記受光器の出力のうち所定の周波数帯域を透過するバンド・パス・フィルタと

前記バンド・パス・フィルタの出力を時間・周波数解析する時間・周波数解析手段とを備えること

を特徴とする請求の範囲 1 に記載の分布型光ファイバセンサシステム。

一  
✕

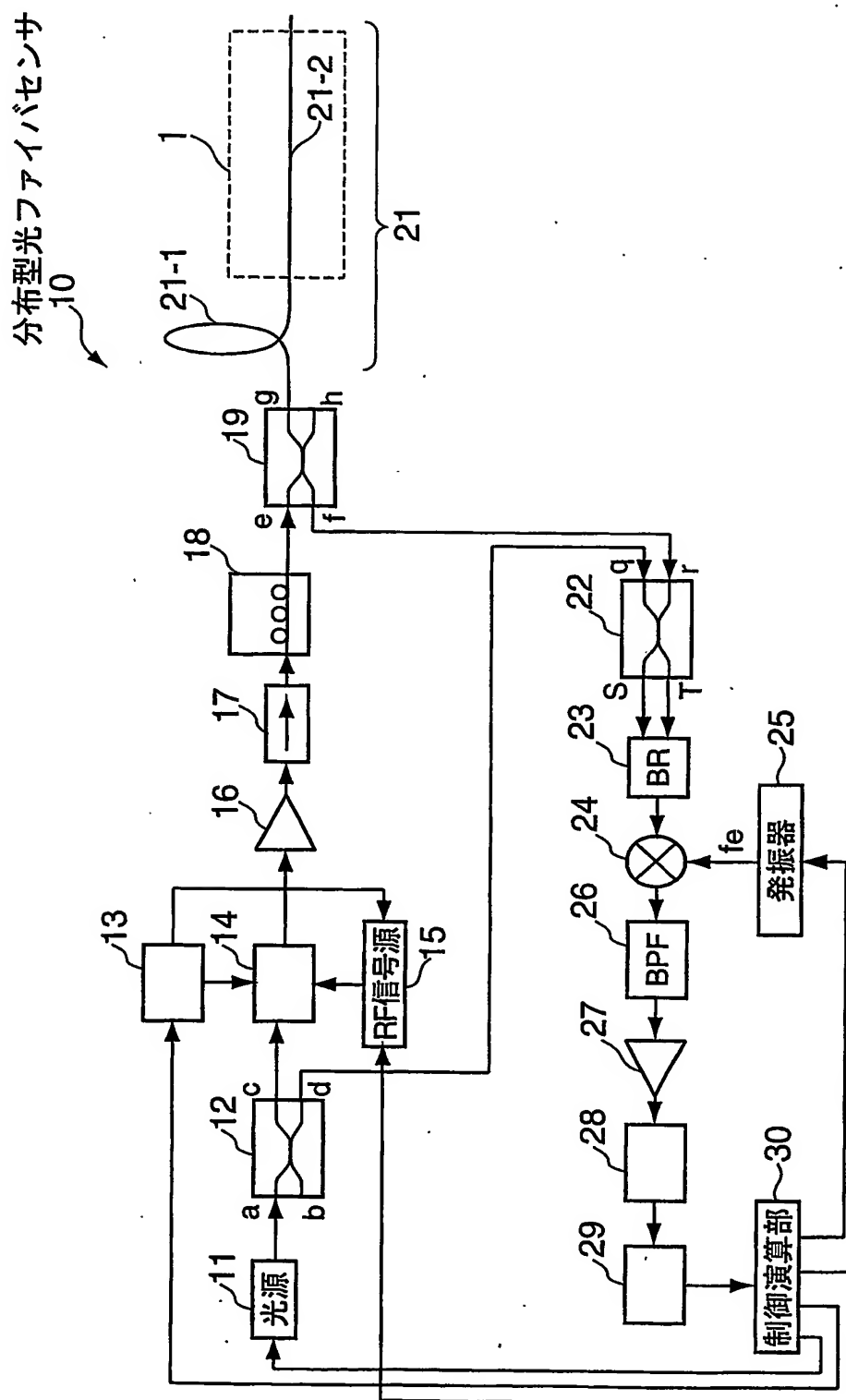


図 2

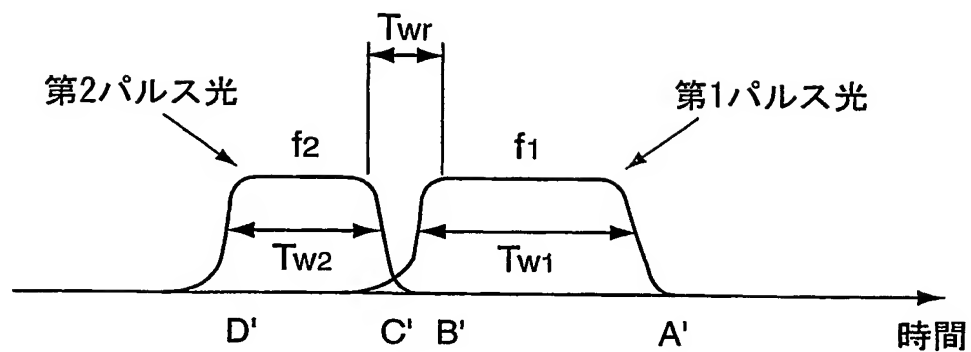


図 3

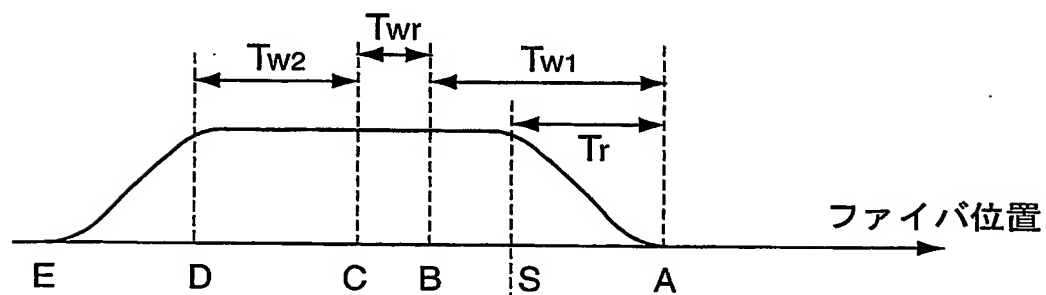


図 4

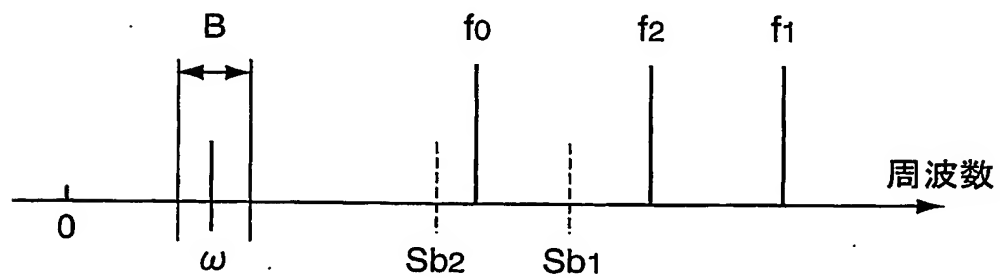


図 5

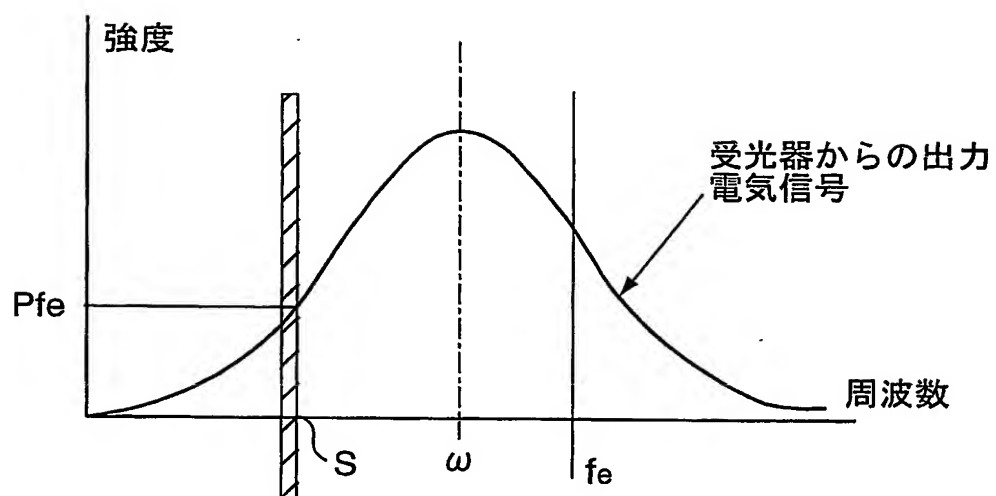


図 6

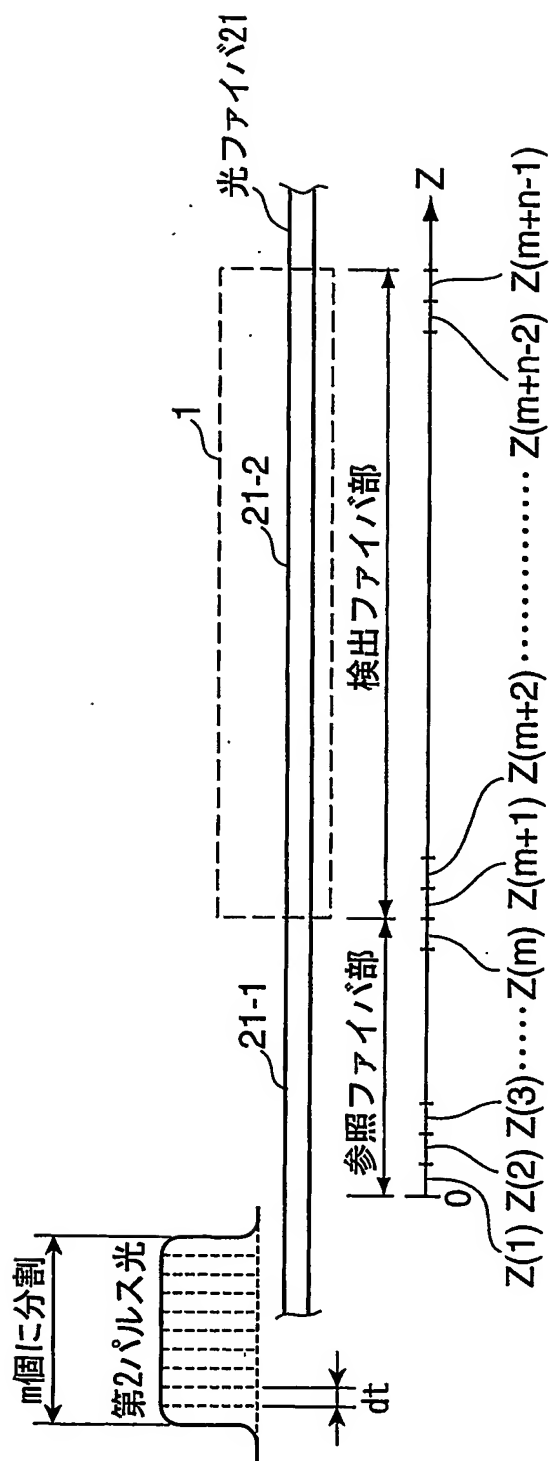




图 7

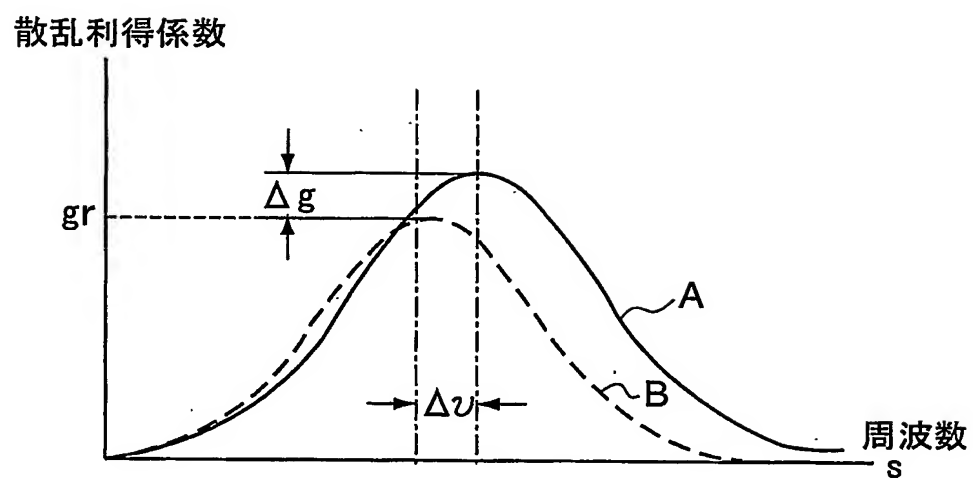


図 8

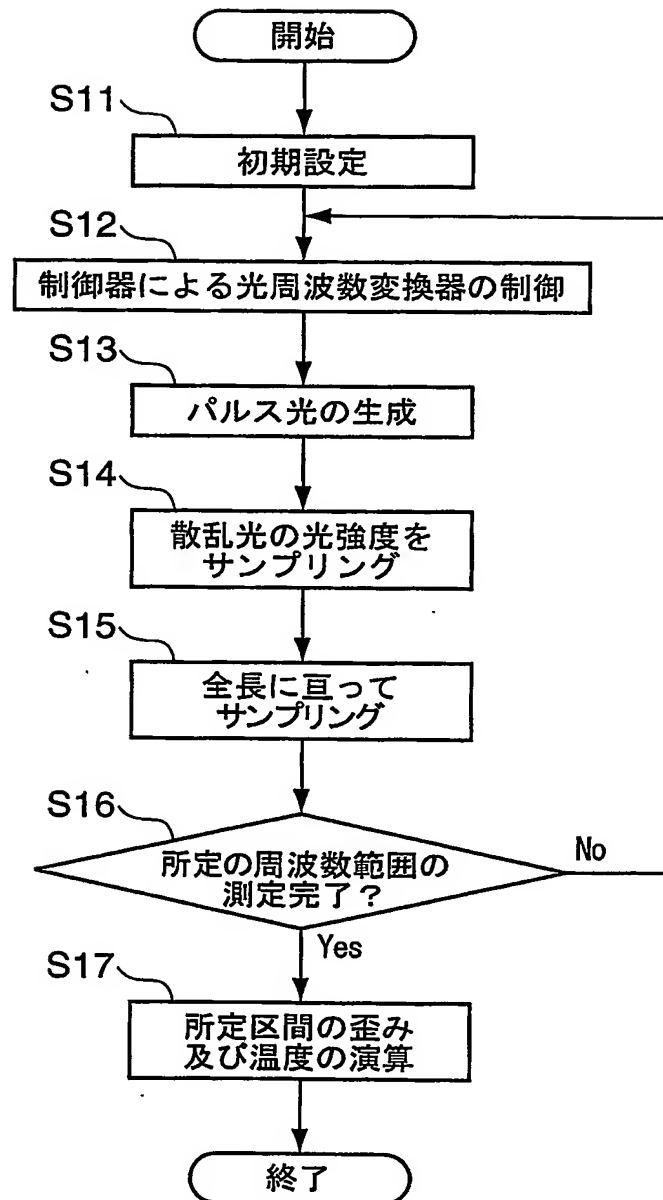


図 9

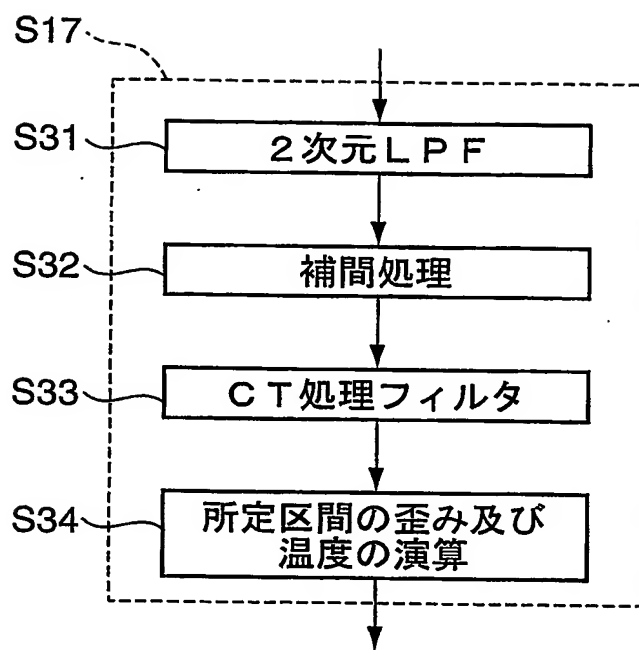
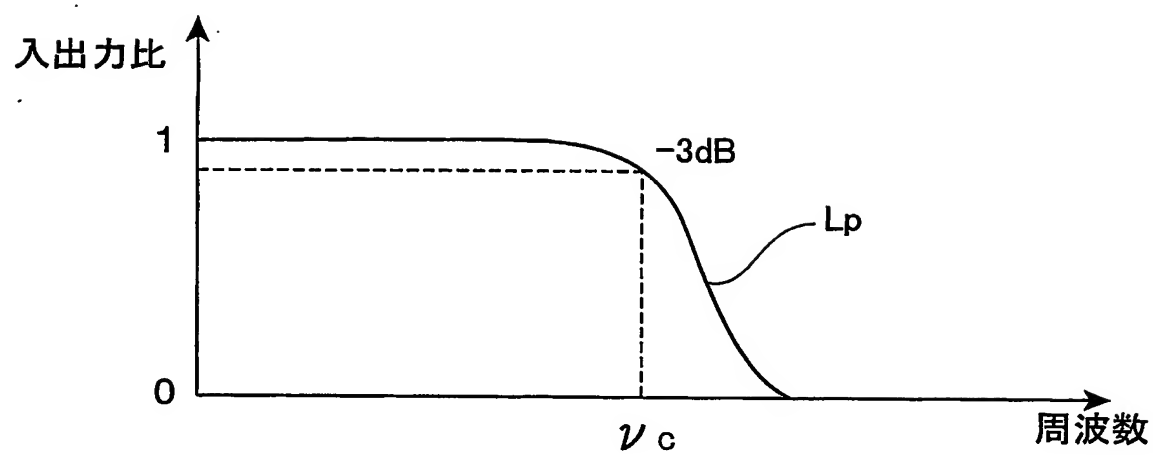


図 10

(a)



(b)

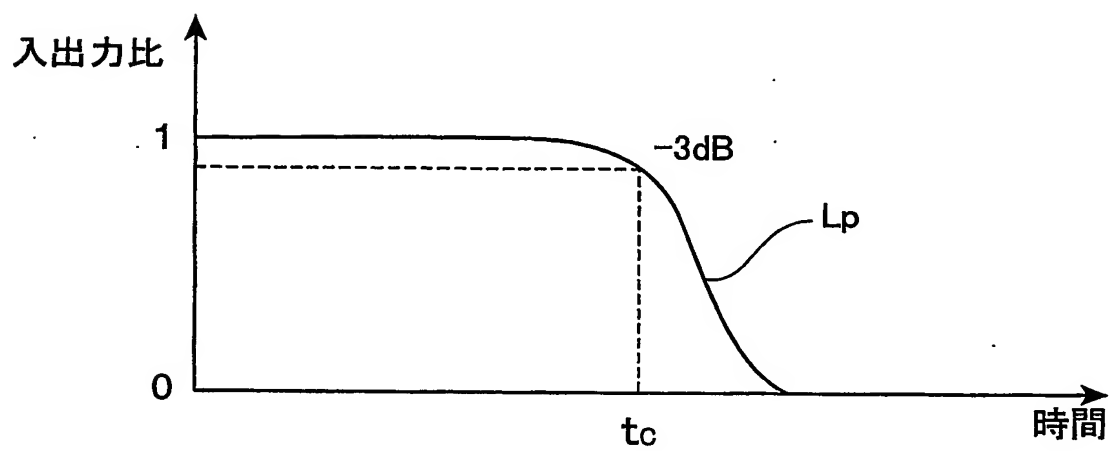


図 11

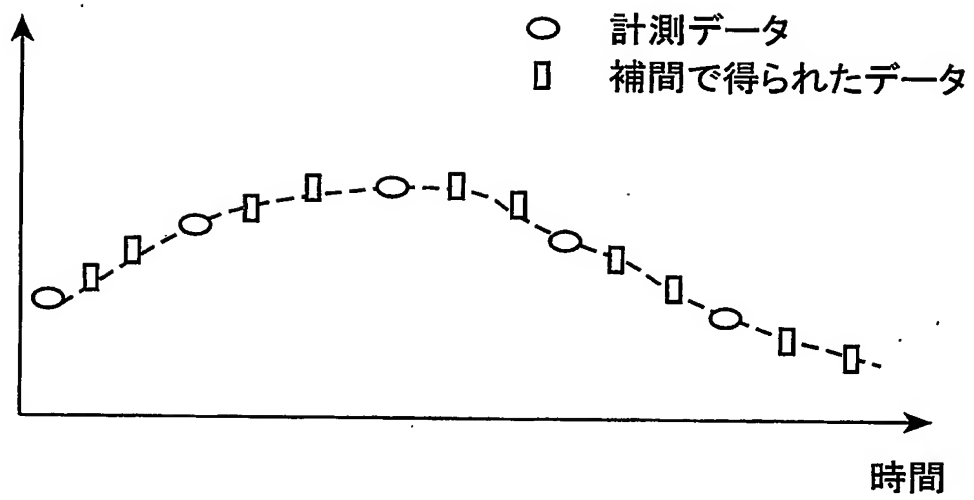


図 12

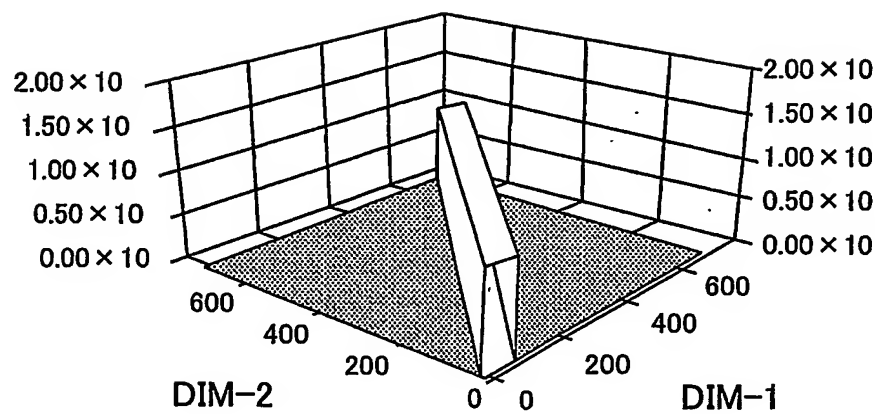


図 13

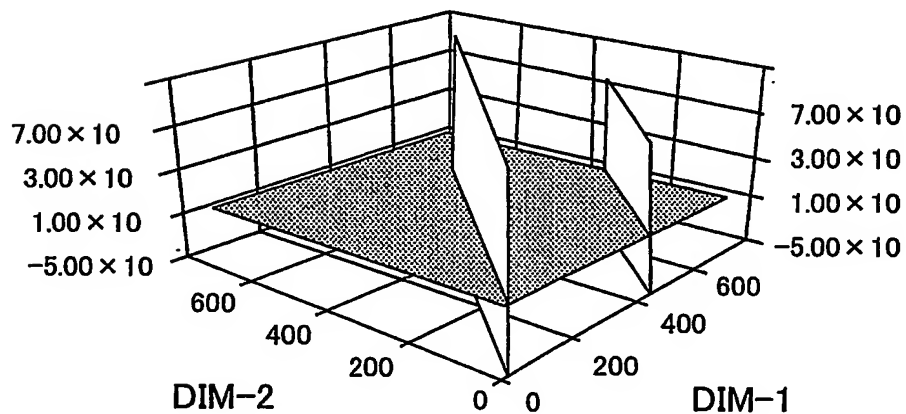


図 14

分布型光ファイバセンサ

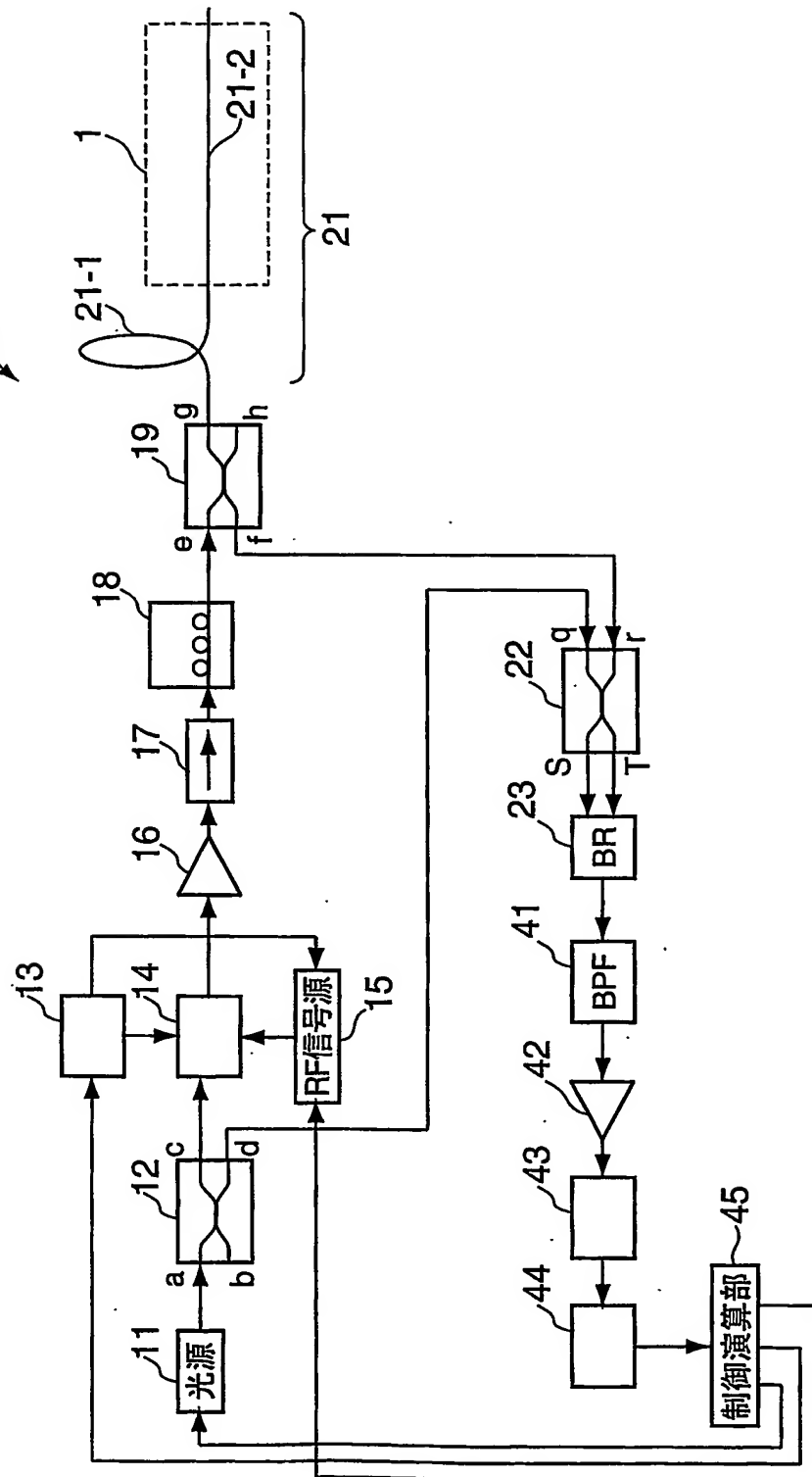


図 15

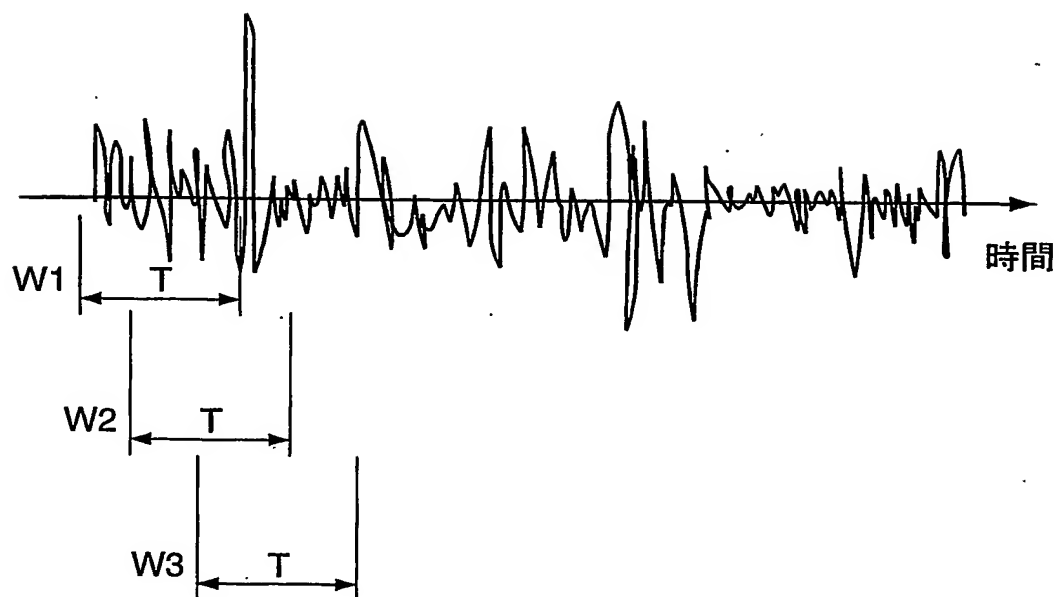


図 16

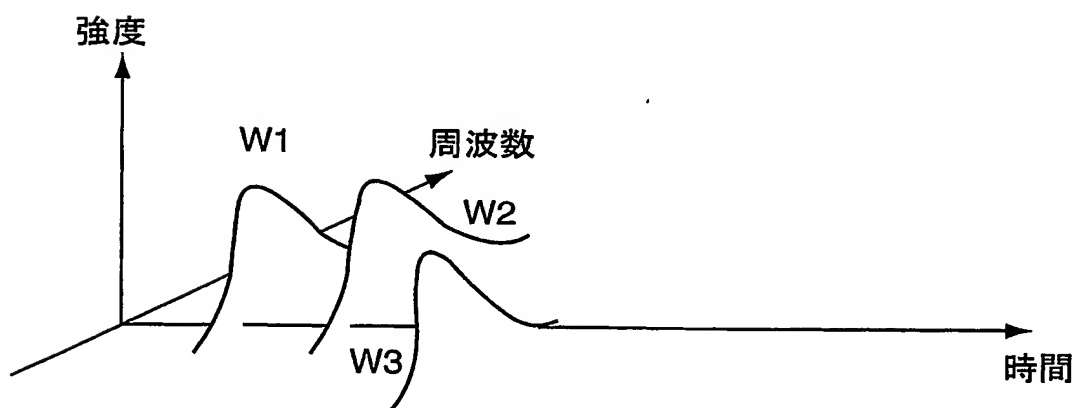




図 17

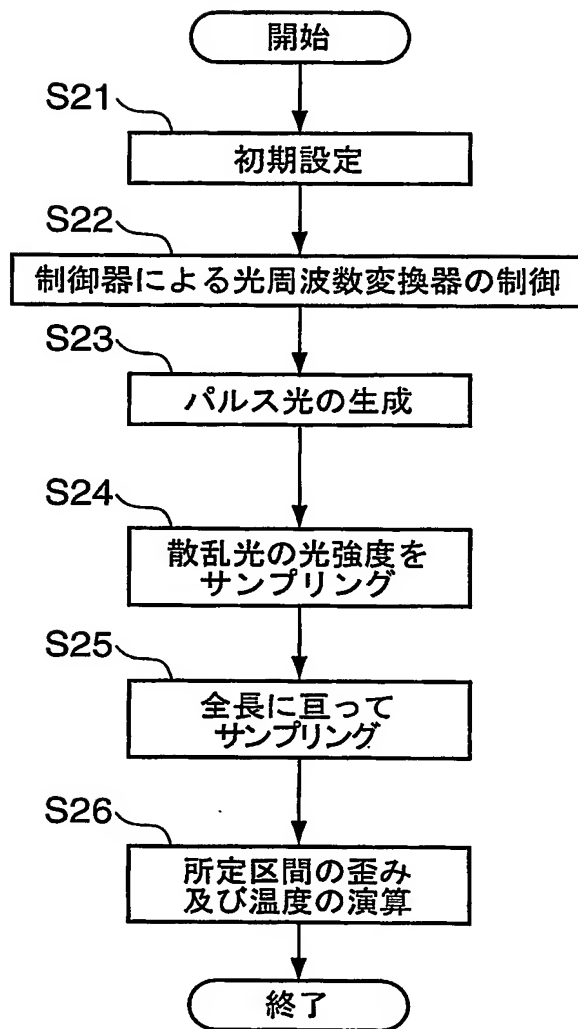








図 21

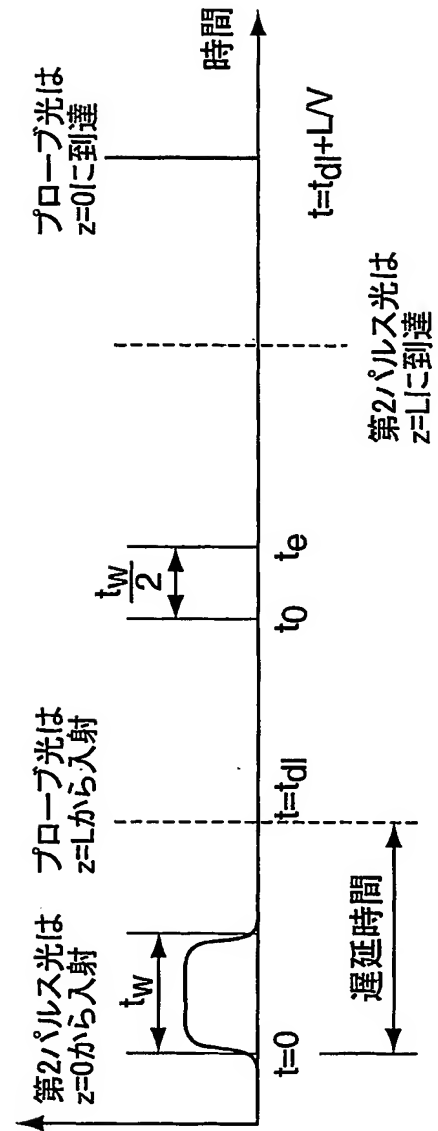
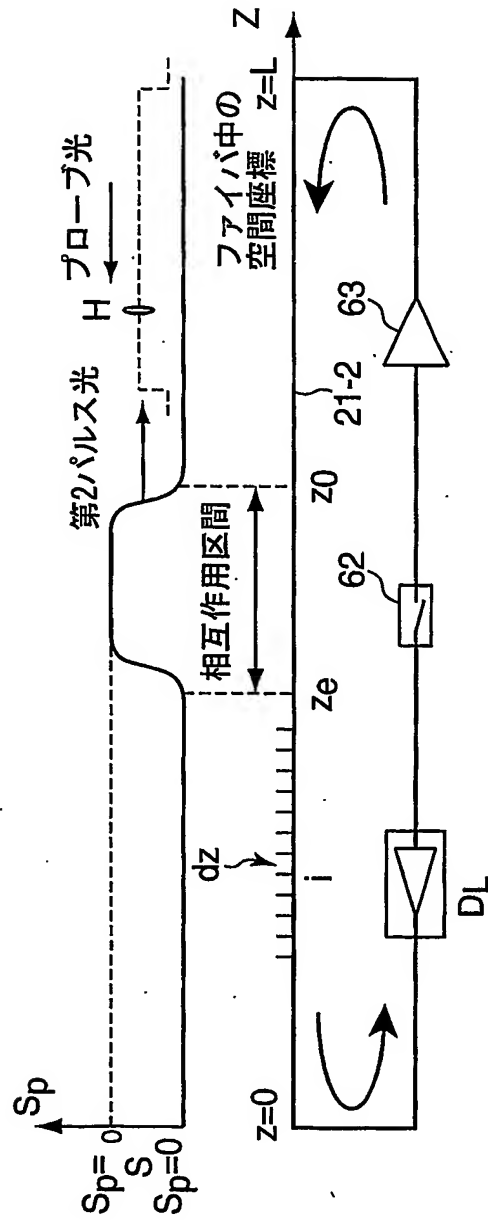


図 22

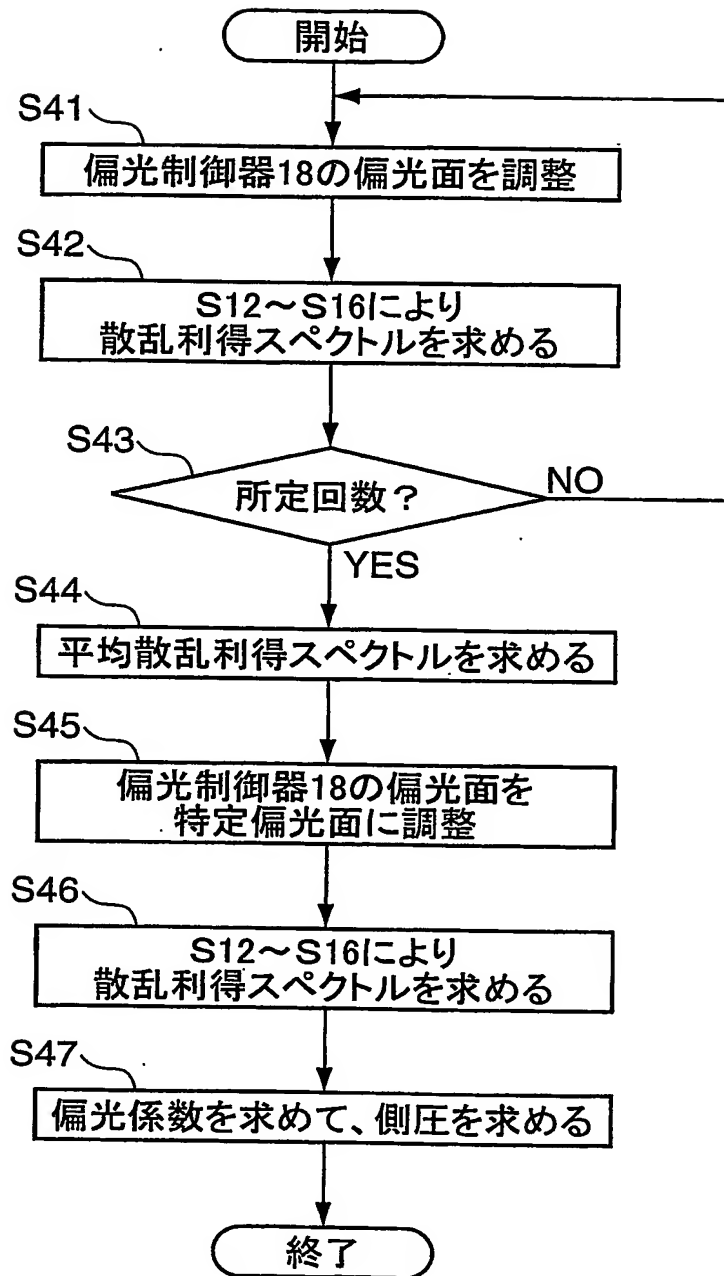
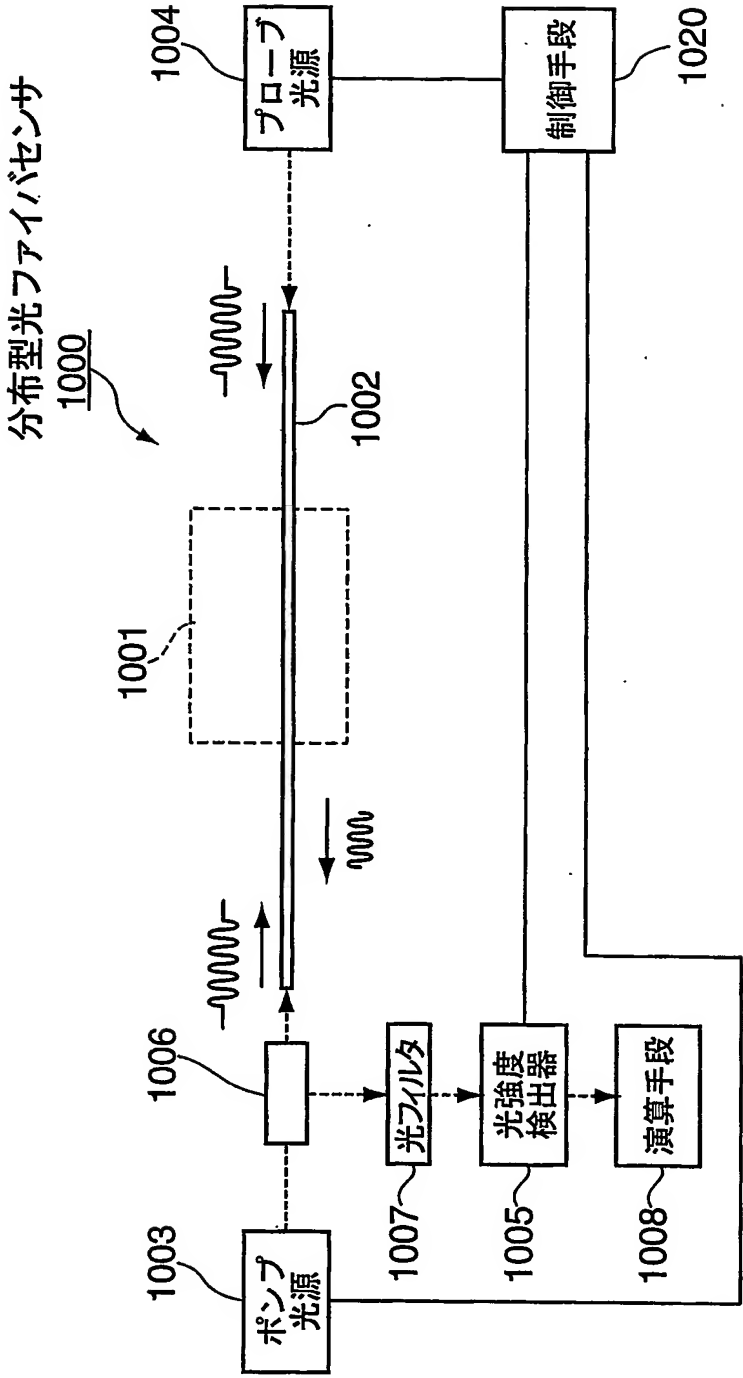


図 23



# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP02/11413

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl<sup>7</sup> G01D5/26, G01B11/16, G01K11/12, G01D21/00

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl<sup>7</sup> G01D5/26, G01B11/16, G01K11/12, G01D21/00, G02B6/00

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2002
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2002	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2002

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 6237421 B1 (Mitsubishi Denki Kabushiki Kaisha), 29 May, 2001 (29.05.01), Full text; all drawings & JP 12-74697 A	1-9
A	US 4708494 A (Marcos Kleiner), 24 November, 1987 (24.11.87), Full text; all drawings & EP 377549 A2 & DE 377549 T	1-9
A	JP 2001-304823 A (Nippon Telegraph And Telephone Corp.), 31 October, 2001 (31.10.01), Full text; all drawings (Family: none)	1-9

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

\* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance  
 "E" earlier document but published on or after the international filing date  
 "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)  
 "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means  
 "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention  
 "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone  
 "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art  
 "&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search  
27 December, 2002 (27.12.02)

Date of mailing of the international search report  
21 January, 2003 (21.01.03)

Name and mailing address of the ISA/  
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.



## 国際調査報告

国際出願番号 PCT/JPO2/11413

## A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl. G01D5/26, G01B11/16, G01K11/12, G01D21/00

## B. 調査を行った分野

## 調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl. G01D5/26, G01B11/16, G01K11/12, G01D21/00, G02B6/00

## 最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報 1922-1996年  
 日本国公開実用新案公報 1971-2002年  
 日本国実用新案登録公報 1996-2002年  
 日本国登録実用新案公報 1994-2002年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

## C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
A	US 6237421 B1 (Mitsubishi Denki Kabushiki Kaisha) 2001. 05. 29, 全文, 全図 & JP 12-74697 A	1-9
A	US 4708494 A (Marcos Kleinerman) 1987. 1. 24, 全文, 全図 & EP 377549 A2 & DE 377549 T	1-9
A	JP 2001-304823 A (日本電信電話株式会社) 2001. 10. 31, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1-9

☐ C欄の続きにも文献が列挙されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

## \* 引用文献のカテゴリー

「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの

「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの

「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)

「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献

「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの

「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの

「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの

「&amp;」 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

27. 12. 02

国際調査報告の発送日

21.01.03

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/JP)

郵便番号100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

井上 昌宏

電話番号 03-3581-1101 内線 3216